



Maria Inês Afonso Feio

Licenciada em Ciências da Engenharia do Ambiente

**Avaliação da viabilidade ambiental do
processo de reciclagem criogénica e da
recauchutagem de pneus usados**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
do Ambiente, perfil de Gestão e Sistemas Ambientais

Orientadora: Prof.^a Doutora Maria da Graça M. Martinho, FCT/UNL
Co-orientadora: Doutora Ana Lúcia Lourenço Pires, FCT/UNL

Presidente: Prof.^a Doutora Ana Isabel Espinha da Silveira
Arguente: Prof. Doutor Nuno Miguel Ribeiro Videira Costa
Vogais: Prof.^a Doutora Maria da Graça M. Martinho
Doutora Ana Lúcia Lourenço Pires



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho 2013

|

Avaliação da viabilidade ambiental do processo de reciclagem criogénica de pneus usados e da recauchutagem

Copyright © Maria Inês Afonso Feio

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTOS

Esta dissertação só foi possível graças ao apoio prestado por parte das minhas orientadoras. Agradeço à Prof^a Doutora Graça Martinho toda a disponibilidade e orientação ao longo do trabalho, à Doutora Ana Pires pela orientação e esclarecimentos prestados.

Agradeço à Recipneu, nomeadamente ao Engenheiro Vasco Pampulim, pela disponibilidade e amabilidade prestadas recebendo-nos (a mim e à Susana Antunes) nas suas instalações e apoiando o nosso trabalho e permitindo troca de informações.

Nada disto seria possível sem a existência de amigos. Por isso queria agradecer à Susana Antunes pelo apoio, motivação e amizade.

Gostava também de agradecer a duas pessoas muito especiais e importantes para o desenvolvimento da dissertação: Rita Marques, obrigada por todo o apoio dado! Obrigada por de vez em quando me dares “abanões”. Necas Diniz, sem a tua parvoíce, a tua paciência para aturar os meus desesperos, garanto que a minha “sanidade mental” não era a mesma! Obrigada por não me deixarem desistir mesmo quando parecia impossível. Gostava também de agradecer à “mãe” Dite e “avó” Mia pela disponibilidade e carinho dado.

E é claro que o maior agradecimento de todos é para os meus pais! Mãe, muito obrigada por tudo o que me proporcionaste, e por todos os conselhos, ideias e esperanças. Pai, muito obrigada pelo apoio, e por tudo que me sempre deste! Adoro a tua parvoíce! Agradeço-vos imenso a oportunidade que me deram!

RESUMO

De acordo com os dados da Valorpneu, foram recolhidos e tratados 93 367 toneladas e 79 114 toneladas de pneus usados, em 2011 e 2012 respectivamente, dos quais 51% e 49% foram recicladas, respectivamente, e 27% e 32%, respectivamente aproveitadas energeticamente, sendo o restante recauchutado (Valorpneu, 2012j; Valorpneu, 2013a).

O objectivo deste trabalho consiste em perceber a viabilidade ambiental do processo de reciclagem pelo método criogénico face à recauchutagem, aplicando a metodologia de Análise do Ciclo de Vida (ACV) *streamlined*, com recurso à Norma ISO 14040 e ao *software* Umberto.

Como a recolha de dados reais das empresas nacionais envolvidas neste sector não foi facilitada, esta ACV foi feita com base nos dados obtidos através da base-de-dados do próprio *software* Umberto e de artigos científicos. Optou-se por seleccionar como categorias de impacte ambiental a analisar a depleção dos recursos abióticos e o aquecimento global.

Relativamente aos resultados obtidos, a recauchutagem apresentou impactes superiores, em ambas as categorias de impacte analisadas. Observando os resultados obtidos neste estudo verifica-se que a reciclagem criogénica é a melhor opção de valorização de pneus usados. No entanto e, segundo outros autores, a recauchutagem é um processo ambientalmente mais viável que a produção de pneus novos.

Assim, estudos futuros deverão ser realizados para estudar a viabilidade económica da reciclagem criogénica e recauchutagem, bem como realizar uma ACV completa e estudar mais categorias de impacte, para complementar este estudo.

Palavras-chave: ACV *streamlined*, Impactes Ambientais, Pneus Usados, Reciclagem, Recauchutagem

ABSTRACT

According to the Valorpneu's data, 93 367 tons and 79 114 tons of used tires were collected and processed, in 2011 and 2012 respectively: which 51% and 49% have been recycled, respectively, 27% and 32% were energetically valued, respectively, and the remaining were retreaded.

The aim of this work is to understand the environmental feasibility of recycling process for retreading *versus* cryogenic method, applying the methodology of Life Cycle Analysis (LCA) streamlined, using the ISO 14040 and the software Umberto.

As the collection of real data was not facilitated by national and others companies involved in this sector, this analysis was based on data obtained through the Umberto software's library and scientific articles. We chose to select as environmental impact categories to assess the abiotic resource depletion and global warming.

With regard to results, retreading impacts presented higher at both impact categories analyzed. Observing the results obtained in this study it appears that recycling is the best option cryogenic recovery of used tires. However, and according to other authors, the retreading process is more environmentally feasible for the production of new tires.

Thus, future studies should be conducted to study the economic feasibility of cryogenic recycling and retreading as well as perform a full LCA and study more impact categories to complement this study.

Keywords: LCA streamlined, Environmental Impacts, Used Tyres, Recycle, Retread

ACRÓNIMOS

ACAP – Associação do Comércio Automóvel de Portugal

ACV – Análise do Ciclo de Vida

ACV-s – Análise do Ciclo de Vida simplificada

ADP – Abiotic Depletion Potencial

ANIRP – Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneus

AICV – Avaliação do Impacte do Ciclo de Vida

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

APIB – Associação Portuguesa dos Industriais de Borracha

CE – Comunidade Europeia

CO₂ – Dióxido de Carbono

CUE – Conselho da União Europeia

DGI – Direcção-Geral da Indústria

DQL – Directiva-Quadro dos Resíduos

EM – Estados Membros

eq - equivalente

ETRMA – European Tyre & Rubber Manufacturers Association

EUA – Estados Unidos da América

GEE – Gases com Efeito de Estufa

GWP – Global Warming Potencial

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

IGAOT – Inspeção-Geral da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território

INR – Instituto dos Resíduos

ISO – International Organization for Standardization

LCA – Life Cycle Assessment

MAOT – Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território

MAOTDR – Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional

ME/MCOTA - Ministérios da Economia/Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente

MRI - Midwest Research Institute

PE/CUE – Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia

PFV – Pneus em Fim de Vida

PR – Ponto de Recolha

PU – Pneus Usados

REPA - Resource and Environmental Profile Analysis

RMA – Rubber Manufacturer's Association

Sb - Antinómio

SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry

SGPU - Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados

SI – Sistema Internacional

SIRAPA - Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente

SLCA – Stream Life Cycle Assessment

SUV - *Sport Utility Vehicle*

UE – União Europeia

u.f. – Unidade funcional

VFV – Veículos em Fim de Vida

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development

ÍNDICE

<u>CAPÍTULO 1</u>	<u>INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
1.1	ENQUADRAMENTO E RELEVÂNCIA	1
1.2	OBJECTIVO E ÂMBITO.....	4
1.3	METODOLOGIA GERAL	4
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
<u>CAPÍTULO 2</u>	<u>PNEUS E PNEUS USADOS.....</u>	<u>6</u>
2.1	CICLO DE VIDA DOS PNEUS	6
2.1.1	ENQUADRAMENTO HISTÓRICO.....	6
2.1.2	DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS PNEUS	7
2.1.3	USO E FIM DE VIDA DO PNEU	12
2.1.4	VALORIZAÇÃO DOS PNEUS USADOS.....	13
2.2	PRODUÇÃO E MERCADO DOS PNEUS USADOS	16
2.3	ENQUADRAMENTO LEGAL.....	17
2.3.1	LEGISLAÇÃO COMUNITÁRIA.....	17
2.3.2	LEGISLAÇÃO NACIONAL	21
2.4	SISTEMAS DE GESTÃO DE PNEUS USADOS	24
2.4.1	SISTEMAS DE GESTÃO DE PNEUS E PNEUS USADOS A NÍVEL EUROPEU	24
2.4.2	SISTEMA NACIONAL DE GESTÃO DE PNEUS E PNEUS USADOS.....	27
2.5	RISCO E IMPACTE AMBIENTAL DOS PNEUS USADOS	33
<u>CAPÍTULO 3</u>	<u>METODOLOGIA.....</u>	<u>34</u>
3.1	PLANEAMENTO DO TRABALHO	34
3.2	METODOLOGIA DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	36
3.2.1	ENQUADRAMENTO	36
3.2.2	DEFINIÇÃO E APLICABILIDADE DA ACV	39
3.2.3	REGULAMENTAÇÃO NORMATIVA	41
3.2.4	ETAPAS DE ACV	42
3.2.4.1	Definição do objectivo e âmbito.....	43

3.2.4.2	Inventário	45
3.2.4.3	Avaliação de impacte.....	46
3.2.4.4	Interpretação	49
3.2.5	LIMITAÇÕES DA ACV.....	49
3.2.6	SIMPLIFICAÇÃO DE ACV – STREAMLINED LIFE CYCLE ASSESSMENT (SLCA)	50
3.2.7	INFORMAÇÃO E DADOS DE BASE	51
CAPÍTULO 4	PRESSUPOSTOS METODOLÓGICOS E RESULTADOS	53
4.1	CONSIDERAÇÕES PRÉVIAS	53
4.2	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA - ACV	53
4.2.1	DEFINIÇÃO DO OBJECTIVO E ÂMBITO.....	53
4.2.1.1	Definição do objectivo.....	53
4.2.2	DEFINIÇÃO DO ÂMBITO	54
4.2.3	QUALIDADE DOS DADOS	57
4.3	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA.....	58
4.3.1	RECICLAGEM – PRODUÇÃO DE GRANULADO DE BORRACHA.....	58
4.3.2	PRODUÇÃO DE PNEUS RECAUCHUTADOS	60
4.4	AVALIAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL.....	62
4.4.1	MODELAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	62
4.4.2	IMPACTES AMBIENTAIS	63
4.4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	66
CAPÍTULO 5	CONCLUSÃO	69
5.1	SÍNTESE CONCLUSIVA	69
5.2	LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	70
5.3	SUGESTÃO PARA FUTURAS INVESTIGAÇÕES.....	71
CAPÍTULO 6	BIBLIOGRAFIA.....	72
ANEXO A		81
ANEXO B		82

ANEXO C	83
----------------------	-----------

ANEXO D	84
----------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fábrica de pneus no início do século XX (Mariano, 2010).....	2
Figura 2.1 - Carcaça do pneu convencional e radial (Michelin, 2010).....	6
Figura 2.2 - Constituição de um pneu (Ost, 2011).....	8
Figura 2.3 - Componentes da montagem do pneu (Ost, 2011).....	11
Figura 2.4 - Pneu usado no processo de recauchutagem (Seiça, 2005).....	14
Figura 2.5 - Sistemas integrados de gestão de pneus usados na Europa e respectivas entidades gestoras (adaptado de ETRMA, 2011)	24
Figura 2.6 - Sistema de responsabilidade do produtor (adaptado de (ETRMA, 2011).....	25
Figura 2.7 – Esquema do sistema de taxas (adaptado de ETRMA, 2011).....	26
Figura 2.8 – Esquema do fluxo financeiro do SGPU (Valorpneu, 2011)	28
Figura 2.9 - Modelo de funcionamento do SGPU (Valorpneu, 2012e)	31
Figura 2.10 - Evolução da quantidade de pneus colocados no mercado, gerados, recolhidos e existentes (Valorpneu, 2012j).....	32
Figura 3.1 - Pilares do Desenvolvimento Sustentável (Pereira, 2009)	38
Figura 3.2 - Estágios do ciclo de vida do produto (Curran, 2006)	39
Figura 3.3 - Fases da Análise do Ciclo de Vida (ISO, 2006a).....	43
Figura 4.1 - Diagrama geral do sistema de reciclagem de pneus usados e produção de granulado de borracha	56
Figura 4.2 - Diagrama geral do sistema de recauchutagem de pneus usados.....	56
Figura 4.3 - Avaliação dos impactes ambientais da reciclagem e da recauchutagem	63
Figura 4.4 - Avaliação dos impactes ambientais nas diferentes fases da reciclagem	64
Figura 4.5 - Avaliação dos impactes ambientais nas diferentes fases da recauchutagem	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Pesos dos pneus de cada categoria (The Basel Convention, 1999)	8
Tabela 2.2 – Composição típica dos pneus de veículos ligeiros e pesados na Europa e EUA (Müller, 2009)	9
Tabela 2.3 – Materiais utilizados no fabrico de pneus (The Basel Convention, 2010).....	10
Tabela 2.4 – Legislação em vigor relativa à gestão de pneus usados	19
Tabela 2.5 – Objectivos nacionais de gestão para os pneus usados, de acordo com Decreto-Lei n.º 111/2001, alterado pelo Decreto-Lei n.º 43/2004 (APA, 2012a)	23
Tabela 2.6 – Ecovalor cobrado aos produtores, em vigor desde de 2009 (Valorpneu, 2011; Valorpneu, 2012j)	29
Tabela 2.7 – Resultados obtidos pela Valorpneu desde 2003 a 2011 (Valorpneu, 2012)	31
Tabela 3.1 – Listagem das normas internacionais pelas quais a ACV se orientava.....	41
Tabela 3.2 – Listagem das Normas Internacionais actualmente em vigor que complementam as anteriores	42
Tabela 3.3 – Elementos obrigatórios e opcionais da fase de AICV (adaptado de ISO, 2006a) .	47
Tabela 3.4 – Lista de categorias de impacte para ICV (adaptado de Ferreira, 2004).....	48
Tabela 3.5 – Bibliografia dos dados utilizados	52
Tabela 4.3 – Entrada e saídas da fase de trituração (Corti e Lombardi, 2004)	59
Tabela 4.4 – Entradas e saídas do processo da fase de pulverização criogénica (Corti e Lombardi, 2004).....	60
Tabela 4.5 - Entrada e saídas do processo de recauchutagem de pneus (Pecnik, 2008)	61
Tabela 4.6 – Resultados da avaliação de impactes ambientais.....	63
Tabela 4.7 – Contribuição do consumo de electricidade no processo de reciclagem criogénica	65
Tabela 4.8 - Análise de sensibilidade para a diminuição do consumo de electricidade na reciclagem e produção de negro de carbono na recauchutagem	67
Tabela 4.9 – Análise de sensibilidade para o aumento consumo de electricidade na reciclagem e produção de negro de carbono na recauchutagem.....	67

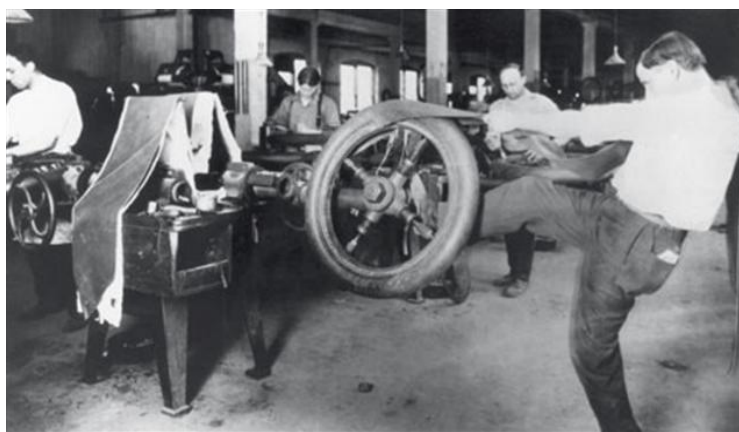
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e relevância

No século XVIII iniciou-se, no Reino Unido, a Revolução Industrial, sendo que nesta nação estavam reunidas as condições políticas, económicas e sociais para conduzir ao desenvolvimento industrial (Weiner, 2007). Um factor que ajudou ao crescimento industrial foi a Revolução Agrícola. Ao longo deste século a produção agrícola aumentou devido às inovações criadas, às novas formas de trabalhar e à alteração de métodos de cultivo. Assim, o avanço científico e tecnológico na agricultura auxiliou o desenvolvimento industrial em Inglaterra, pois era necessário aumentar as produções de alimentos de modo a satisfazer o aumento da população, especialmente nos centros urbanos (Weiner, 2007). Com isto houve também um crescimento ao nível da indústria têxtil (Weiner, 2007). Embora a industrialização tenha contribuído para a inovação de bens materiais, não foi apenas a multiplicação de indústrias que afectou o ambiente. Diversas acções humanas causaram desequilíbrios ecológicos, trazendo prejuízos e vantagens (Marcovitch, 2006).

Com a Revolução Industrial houve uma busca incessante por novas tecnologias, produtos, processos, o que significou mudanças constantes, como a deslocação dos camponeses para a cidade à procura de trabalho, pois era onde estava concentrado o grande centro industrial. De forma a satisfazer as necessidades de deslocações, quer por parte dos trabalhadores quer por parte dos responsáveis pelas fábricas, foi necessária uma evolução ao nível da arquitectura da roda. A partir da segunda metade do século XIX, pelas mãos de Robert Thomson, Dunlop e irmãos Michelin, começaram a ser desenhados os primeiros esboços e projectos dos pneus, após Charles Goodyear ter inventado o processo de vulcanização da borracha (APA, 2012b).

O processo da vulcanização consiste num processo químico que modifica a estrutura química da borracha onde as moléculas do polímero são unidas numa rede elástica tridimensional ao entrarem em contacto com moléculas maiores (Gomes, 2012; Smith, 2010). Trata-se de um processo de reticulação, ou seja, as moléculas da rede tridimensional estão unidas quimicamente em diversos pontos ao longo da cadeia, possibilitando que a borracha melhore as suas propriedades elásticas. Estas propriedades facilitaram a evolução dos automóveis, naturalmente ao nível dos pneus. Os pneus são um elemento bastante importante para que o desempenho da condução seja o melhor, não fossem os pneus o vínculo de ligação entre o veículo e a estrada (Mtecnica, 2009). A Figura 1.1 ilustra a fabricação dos pneus no início do século XX.



**Figura 1.1 - Fábrica de pneus no início do século XX
(Mariano, 2010)**

Em resultado das exigências da evolução dos automóveis, que se estão a tornar cada vez mais potentes e pesados (Mariano, 2010), é importante que se continue a acompanhar a evolução tecnológica, a investigar novos materiais e novos processos de fabricação de pneus, de modo a obter sempre o melhor desempenho e segurança dos veículos. Isto tem-se traduzido nas últimas décadas por uma exploração abrupta e pouco consciente de recursos naturais e geração de resíduos, cada vez em maior quantidade e dificuldade de gestão, o que tem representado consequências negativas para as gerações presentes e futuras, contrariando o conceito de desenvolvimento sustentável.

Devido às consequências negativas da deposição de pneus usados (PU) em aterros, a União Europeia (UE), através da Directiva n.º 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril, instaura a proibição da deposição de pneus usados em aterros. Esta proibição fez com os vários Estados-Membros procurassem novas soluções para o destino a dar aos pneus usados, nomeadamente a recauchutagem, a reciclagem, e outros processos de valorização. Assim, tem-se estimulado a utilização dos produtos resultantes da valorização destes resíduos em diversas aplicações, por exemplo, na construção civil, e promovido a reutilização de pneus usados após terem sido sujeitos a tratamento.

Uma possível alternativa para a valorização de pneus usados é a sua reciclagem por processo mecânico, onde se obtém pedaços de pneus, resultantes da etapa de corte, com forma irregular e variadas dimensões – *chips* –, ou por processo criogénico, onde após sofrerem a etapa de corte, estes pedaços passam por um túnel criogénico onde são novamente fragmentados originando granulados de forma e dimensões mais homogéneas (Recipneu, 2012).

Os *chips* têm diversas aplicações essencialmente no ramo da construção civil, podem fazer parte integrante em sistemas de drenagem de aterros sanitários, cujo objectivo é substituir materiais agregados naturais inertes, como é o caso da brita calcária, seixo ou cascalho (Cabeças e Dores, 2008, *vide* Gomes, 2009).

Outra alternativa para a valorização dos pneus usados é a sua recauchutagem. Neste processo, o ciclo de vida dos pneus usados é prolongado, a partir do momento em que lhes é retirada a banda de rodagem, já gasta, e colocado um novo piso. Esta opção não tem vindo a ser muito utilizada pelos proprietários de veículos ligeiros, no entanto, as empresas com frotas de veículos pesados e o sector aeronáutico beneficiam bastante com este tipo de valorização. Segundo vários autores, nomeadamente a Directora Geral da Valorpneu, Climénia Silva (Silva, 2007), a recauchutagem é uma opção bastante viável, pois além de prolongar a vida dos pneus, contribui para a redução de recursos naturais, nomeadamente matérias-primas e energia, quando comparada com a produção de um pneu novo (Silva, 2007).

Em Portugal, na sequência da proibição da deposição de pneus usados em aterros, determinada pela Directiva n.º 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril, e por forma a garantir que os pneus, após a sua utilização, não fossem abandonados ou queimados descontroladamente a céu aberto, foi publicado o Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, que estabelece os princípios e normas aplicáveis à gestão de pneus e pneus usados, e criada, em 2002, a uma entidade gestora para o fluxo de pneus usados gerados anualmente - a Valorpneu. Esta entidade gestora pôs em funcionamento, em 2003, o Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados (SGPU). No capítulo 2.2.2 é abordado em mais pormenor o funcionamento do SGPU.

De acordo com a Valorpneu (2012), em 2011 foram colocados no mercado nacional 72 785 toneladas de pneus novos e recolhidos para valorização, no âmbito do SGPU, cerca de 93 mil toneladas de pneus usados. Da quantidade total recolhida, 48 mil toneladas foram recicladas, 25 mil toneladas valorizadas energeticamente e a restante parte recauchutada ou reutilizada (Valorpneu, 2012). Já no ano de 2012 estes valores sofreram uma queda de cerca de 10 mil toneladas de pneus colocados no mercado, tendo sido recolhidos e tratados cerca de 79 mil toneladas, das quais 49% seguiu para reciclagem, 32% para valorização e a restantes toneladas para recauchutagem ou reutilização (Valorpneu, 2013).

De acordo com o Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, a política e legislação referente a resíduos deve respeitar determinada ordem de prioridades, princípio da hierarquia dos resíduos, relativamente às opções de prevenção e gestão de resíduos (prevenção e redução; reutilização; reciclagem; valorização e eliminação). Este documento legal refere ainda, que no caso dos fluxos específicos esta hierarquia “pode não ser observada desde que as opções adoptadas se justifiquem pela aplicação do conceito do ciclo de vida aos impactes globais da produção e gestão dos resíduos em causa”. Desta forma, torna-se relevante saber se esta hierarquia é coerente com o resíduo em estudo. Ou seja, embora a recauchutagem (preparação para reutilização) seja prioritária face à reciclagem segundo esta hierarquia, porque é que as metas para as taxas de recauchutagem ainda nunca foram alcançadas, ao contrário da reciclagem.

1.2 Objectivo e âmbito

O objectivo da presente dissertação consiste em comparar o desempenho ambiental de dois possíveis destinos de valorização a dar aos pneus usados, a reciclagem criogénica e a recauchutagem, e perceber como afectam os recursos naturais. O estudo é desenvolvido aplicando uma metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV), com recurso ao *software* Umberto.

Um outro interesse deste trabalho passa por tentar perceber porque é que a meta estabelecida pela legislação nacional para a recauchutagem nunca foi alcançada desde 2004. Até ao ano de 2007 esta meta estava estabelecida nos 30%, tendo sido reduzida para 27% no período de 2009 a 2013 (Valorpneu 2012; APA, 2012). Ainda assim, e segundo o Relatório Anual & Contas de 2011 e de 2012 da Valorpneu, a taxa de recauchutagem continua a não ser atingida. Todavia, as taxas de recolha e reciclagem ultrapassam a meta estabelecida, que são de 96% e 69% respectivamente, para o mesmo período (Valorpneu, 2012).

1.3 Metodologia geral

A nível metodológico, o presente estudo foi estruturado em seis fases de modo a atingir os objectivos propostos.

- **Fase I** – Pesquisa e revisão bibliográfica. O estudo teve início com uma pesquisa documental de informação relevante como história do pneu, funcionamento do SGPU. Para tal, foram utilizados recursos como relatórios técnicos, dissertações, artigos científicos, legislação comunitária e nacional aplicável aos pneus usados. Assim foi possível um conhecimento mais abrangente e técnico sobre a gestão dos pneus usados.
- **Fase II** – Pesquisa e selecção de dados sobre a valorização de pneus usados. Nesta fase foi feita uma recolha de dados relativos às entradas e saídas dos processos de reciclagem criogénica e recauchutagem dos pneus usados através de artigos científicos e dos dados fornecidos pelo responsável da recicladora de pneus em território nacional – Recipneu. Estes valores foram utilizados na Fase III.
- **Fase III** – Tratamento e análise dos resultados. Esta fase teve como base o tratamento e análise dos dados recolhidos na fase anterior, a realização de esquemas representativos dos processos de reciclagem criogénica e da recauchutagem e a inserção dos dados recolhidos na Fase II no *software* Umberto, utilizado para a realização da ACV. Esta fase envolveu igualmente a familiarização com esta ferramenta informática, através da realização de alguns ensaios com exemplos de casos de estudo já resolvidos.

- **Fase IV** – Selecção da metodologia e dos indicadores a utilizar. Nesta fase foi seleccionada a metodologia de avaliação de impacte – *CML 2000* – bem como os indicadores de impacte ambiental, depleção de recursos abióticos e aquecimento global, tendo sido posteriormente aplicado no *software* Umberto.
- **Fase V** – Análise de sensibilidade. De modo a testar a robustez dos resultados obtidos procedeu-se a uma análise de sensibilidade aos processos que mais contribuem para os impactes ambientais estudados.
- **Fase VI** – Redacção e revisão da dissertação. Esta fase foi vertical em todas as fases anteriores uma vez que se foi redigindo à medida que o estudo ia avançando. A última etapa desta fase foi então a revisão final da dissertação.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo inclui o enquadramento e relevância do tema, objectivos e âmbito do estudo e organização da dissertação. Neste capítulo é também descrita a metodologia geral da dissertação, onde é feita referência às principais fases que guiaram a realizaram deste trabalho.

No segundo capítulo, é feita a revisão dos conceitos considerados relevantes referentes aos pneus e pneus usados. Foi feito um enquadramento a nível europeu e nacional e explicado o funcionamento do SGPU em Portugal. É também abordado o ciclo de vida dos pneus e apresentados os potenciais riscos e impactes ambientais dos pneus usados.

O terceiro capítulo diz respeito à revisão e explicação do que é a ACV, bem como a descrição da metodologia aplicada, das simplificações realizadas, respectivas etapas e limitações. Assim, é exposto o âmbito e o objectivo desta ACV, a fase de inventário e por fim a avaliação do impacte ambiental.

No quarto capítulo são apresentados os principais pressupostos metodológicos e os resultados obtidos, onde estão incluídas as fases de definição do objectivo e âmbito, inventário do ciclo de vida e análise de sensibilidade.

A síntese conclusiva acerca do trabalho elaborado encontra-se no quinto capítulo, onde estão incluídas as principais limitações do trabalho e sugestões para futuras investigações.

No último capítulo apresenta-se a listagem da bibliografia utilizada neste trabalho.

CAPÍTULO 2 PNEUS E PNEUS USADOS

2.1 Ciclo de vida dos pneus

2.1.1 Enquadramento histórico

Foi pela mente de um engenheiro ferroviário escocês, Robert William Thomson, que surgiu a invenção do pneu, em 1846 (ETRMA, 2011g). Este pneu ficou conhecido como “*Aerial Wheel*” e consistia num tubo oco de lona e borracha da Índia, que posteriormente era vulcanizada e insuflada com ar. Este processo surgiu em 1839, através do americano Charles Goodyear, e tem como principal objectivo tirar o máximo proveito das propriedades da borracha, como resistência e elasticidade, eliminando os seus inconvenientes, tal como ser dura e quebradiça no Inverno, mole e pegajosa no Verão (APA, 2012b).

Anos mais tarde, pela mente de Jonh Boyd Dunlop, surge a ideia de associar couro e ar ao conjunto de borracha e tela no pneu, sendo que este seria usado nas bicicletas (APA, 2012b). Esta ideia foi complementada, em 1891, com a invenção dos irmãos Michelin, André e Edouard, de pneus cuja facilidade de manutenção era maior, pois enchiam-se através de uma válvula sendo possível removê-los caso estivessem danificados (APA, 2012b).

O pneu radial foi concebido e patenteado em 1946 pela Michelin e resulta de um conjunto de novas soluções, que foram emergindo no mundo das maquinarias automóveis, ao longo dos anos, de modo a satisfazer as constantes exigências tecnológicas (Michelin, 2010). O pneu radial difere do convencional essencialmente pela constituição da carcaça (Figura 2.1). No convencional, as lonas cruzadas são sobrepostas e a banda de rolamento e o flanco não estão diferenciados. A carcaça do radial é mais flexível pois tem arcos radiais e uma cinta metálica que estabiliza a banda de rolamento, sendo que esta é independente dos flancos (Michelin, 2010).

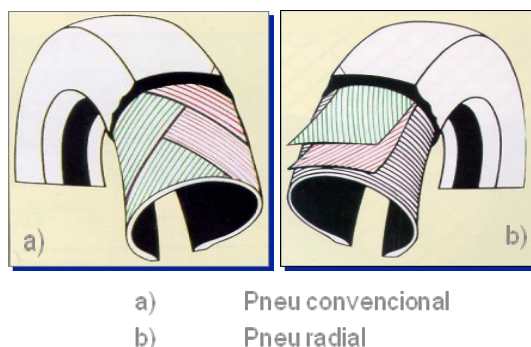


Figura 2.1 - Carcaça do pneu convencional e radial (Michelin, 2010)

2.1.2 Definição e características dos pneus

O pneu é uma peça de borracha e um componente essencial aos veículos que assegura a aderência do mesmo ao solo, bem como participa na suspensão (APA, 2012b). A estrutura do pneu é complexa e tem como principais funções a transmissão da força do motor à estrada, necessária à propulsão (movimento que “cria “ impulsão) e o que condiciona a direcção em que o veículo circula. Devido à sua elasticidade, o pneu amortece as irregularidades do pavimento e assegura o conforto na condução, e ainda mantém o ar sob pressão no seu interior (The Basel Convention, 1999).

Actualmente o pneu é constituído por diversos componentes com propriedades muito diferentes cujo processo de fabrico deve ser realizado com grande precisão (Figura 2.2), designadamente (Michelin, 2012; Valorpneu, 2012):

- A capa de borracha sintética encontra-se no interior do pneu e por ser bastante estanque ao ar funciona como câmara-de-ar;
- A carcaça é constituída por cabos finos de fibras têxteis que se encontram colados na borracha em ângulos rectos; são estes cabos que conferem a estrutura ao pneu e lhe garante resistência à pressão;
- O talão tem a função de transmitir os binários do motor e de travagem da jante à área de contacto com o solo; os aros de talão fixam o pneu à jante e conseguem suportar até 1800 kg sem risco de ruptura;
- Os flancos de borracha macia são responsáveis pela protecção do pneu contra os choques, o que poderia significar danos na carcaça igualmente; a ligação entre pneu e jante é assegurada por uma borracha dura;
- As lonas de reforço, feitas com cabos de aço muito finos, mas muito resistentes, são cruzadas obliquamente e coladas, uma sobre a outra; o cruzamento dos fios de aço das lonas e dos fios de têxteis da carcaça forma triângulos indeformáveis;
- A banda de rolamento (ou rodagem) é disposta sobre as lonas de reforço, sendo esta a parte do pneu que ficará em contacto com o pavimento e onde serão desenhadas as esculturas; na área de contacto com o solo, a banda de rolamento está sujeita a esforços muito importantes aos quais terá de resistir; a mistura que constitui a banda de rolamento deve ser aderente em todos os tipos de solo, ter a capacidade de resistir ao desgaste e à abrasão, bem como aquecer o menos possível.

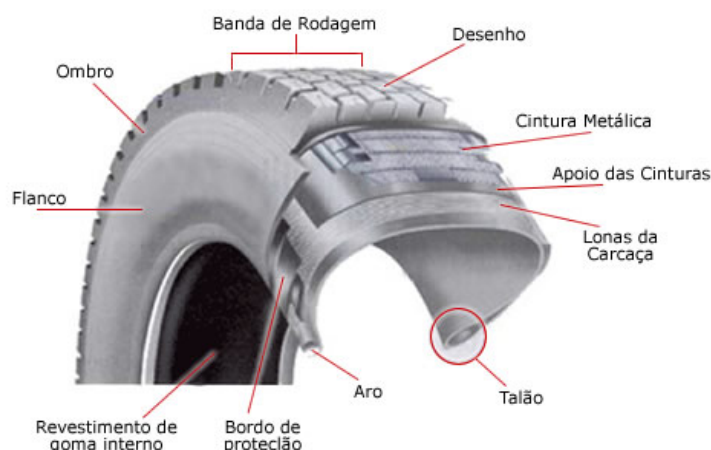


Figura 2.2 - Constituição de um pneu (Ost, 2011)

A composição do pneu

Cerca de 85% do número total de pneus manufacturados são pneus de veículos ligeiros e pesados, sendo que geralmente a classificação de pneus se divide entre estes dois tipos (The Basel Convention, 1999). No entanto, nos Estados Unidos da América (EUA) são identificados, pela *U.S. Rubber Manufacturing Association* – RMA, três tipos de pneus de veículos ligeiros, os semi-pesados (*pickups* e *sport utility vehicle*) com peso inferior a 3855 toneladas, e pesados (Beck, 2005).

Os pneus são fabricados por uma variedade de componentes que dão origem ao polímero adaptado a uma larga variedade de aplicações, desde alto rendimento desportivo a máquinas de grande porte de movimentação de terras (WRAP, 2007). Desta forma, consoante a aplicação dos pneus, sua dimensão e utilização, estes variam no seu *design*, construção e peso total, como se pode observar na Tabela 2.1 (The Basel Convention, 1999).

Tabela 2.1 – Pesos dos pneus de cada categoria (The Basel Convention, 1999)

Tipo de veículo	Peso aproximado por unidade (kg)	Unidades por tonelada (n.º/ton)
Ligeiro	6,5 a 9	100 a 154
Semi-ligeiro	11	91
Pesado	50	20
Outros pesados (longos)	55 a 80	12 a 18
Agrícolas	100	10

Embora existam diversos produtores de pneus e cada um com os seus segredos comerciais, a composição dos mesmos é muito semelhante distinguindo-se, então, apenas dois tipos de veículos: ligeiros e pesados. Na Tabela 2.2 é possível verificar de forma genérica os constituintes dos pneus destes dois tipos de veículos na Europa e Estados Unidos da América (Müller, 2009).

Tabela 2.2 – Composição típica dos pneus de veículos ligeiros e pesados na Europa e EUA (Müller, 2009)

Material	Europa	EUA	Europa	EUA
	Ligeiros (%)		Pesados (%)	
Borracha sintética	23	27	15	14
Borracha natural	22	14	30	27
Negro de carbono	28	28	20	28
Aço	13	14-15	25	14-15
Fibra têxtil, aceleradores, aditivos químicos	14	16-17	10	16-17

Nos EUA, as percentagens no geral destes constituintes são semelhantes, embora as proporções de borracha natural e sintética sejam ligeiramente diferentes. Além destas diferenças percentuais, uma outra diferença entre os pneus americanos e europeus tem a ver com o peso do próprio pneu. Um pneu novo americano pesa cerca de 11 kg e um europeu pesa cerca de 8 kg, nas mesmas condições.

O pneu tem como matérias-primas um misto de compostos tais como, borracha natural e sintética, negro de carbono, têxteis, aço e alguns aditivos químicos. A Tabela 2.3 descreve os materiais, a sua fonte e onde e em que medida são aplicados num pneu. Segundo Freire (2000), as proporções de borracha natural e sintética que se verificam nos pneus dependem do uso ao qual este vai estar sujeito. Por exemplo, um pneu de um veículo ligeiro contém uma maior percentagem de borracha sintética. No entanto, um veículo pesado incorpora pneus onde a percentagem de borracha natural é superior (Freire, 2000; The Basel Convention, 2010).

Tal como existem estas proporções para a borracha, a relação entre aço e têxtil também varia, ou seja, os pneus de veículos ligeiros têm uma maior quantidade de têxtil do que aço, e nos pneus de pesados acontece o oposto (Freire, 2000; Müller, 2009). Estas diferenças acontecem provavelmente, devido aos pneus de veículos ligeiros terem necessidade de satisfazer normas de qualidade superior (resistência melhorada à derrapagem e ao desgaste, maiores velocidades, baixo rolamento) para maior competitividade no mercado (Dunn, 1991; Pehlken, 2005). Já nos veículos pesados é esperado que estes suportem cargas mais pesadas e por longas distâncias em vez de atingirem grandes velocidades (Müller, 2009).

Tabela 2.3 – Materiais utilizados no fabrico de pneus (The Basel Convention, 2010)

Material	Fonte	Aplicação
Borracha natural	Obtida essencialmente, da seiva da árvore <i>Hevea brasiliensis</i>	Representa entre 30 a 40% do total da parte elástica do pneu de veículos ligeiros e entre 60 a 80% de um pneu de veículo pesado.
Borracha sintética	Petroquímicos	Representa entre 60 a 70% do total da parte elástica do pneu de veículos ligeiros e entre 20 a 40% de um pneu de veículo pesado.
Cabos de aço, fio metálicos	Extracção	Fornece rigidez e resistência aos pneus
Tecido de reforço	Poliéster, rayon, nylon	Garante resistência à estrutura e às carcaças do pneu de veículo ligeiro
Carbon black (negro de fumo)	Negro de fumo provém reservas de petróleo	Confere durabilidade e resistência ao desgaste e rompimento
Óxido de zinco	Mineral pode ser extraído de minas ou obtido através da reciclagem do zinco	Aditivo da vulcanização
Compostos de enxofre	Extraído de minas ou do gás ou petróleo	Principal agente da vulcanização
Outros aditivos	Origem natural ou sintética	Usado em diversos compostos de borracha para modificar as suas propriedades
Borracha reciclada	Recuperada de outros pneus usados ou produtos de borracha	Utilizado nalguns componentes de borracha para produzir novos produtos de borracha

Processo de produção do pneu

O fabrico do pneu inicia-se com a selecção da borracha, natural e sintética, que é combinada com os restantes constituintes como o negro de carbono, o enxofre, o silicone, e os restantes aditivos (APA, 2012b). Os ingredientes são misturados em misturadoras de grande capacidade, para aguentar elevadas pressões e temperaturas. Esta mistura resulta num composto negro e viscoso que posteriormente terá de ser processado novamente (Goodyear, 2012). Quando a borracha está fria é processada em placas, seguindo para as instalações de corte. Aqui, são cortadas em faixas, que mais tarde serão os flancos, os pisos e outras partes do pneu. Para revestir o tecido utilizado no corpo do pneu, composto por poliéster, *rayon* ou *nylon*, será utilizado outro tipo de borracha (Goodyear, 2012).

O talão tem a forma de um aro e é constituído por fios de aço de alta resistência, sendo revestido com borracha e fixado na jante do veículo (Mullineux, 2004). As lonas são duas camadas em aro de tecido que são colocadas e um par de tiras de revestimento que, juntos, dão força e flexibilidade ao pneu e ainda impedem o desgaste que resulta da fricção da jante (APA, 2012b; Goodyear, 2012). O piso é o último constituinte a integrar o pneu, pois antes é necessário incorporar as cintas metálicas que vão resistir aos furos (Goodyear, 2012). Todas as partes são firmemente unidas por compressão através de rolamentos automáticos. Deste processo resulta o pneu que se designa de pneu verde, ou pneu não curado. Só após a cura do pneu é que este será inspecionado. Na etapa de cura, o pneu verde é prensado num molde que concederá a este a forma final, o padrão do piso (banda de rodagem) e as informações do fabricante e marcas legais na lateral do pneu. De seguida, os moldes, que estão a elevadas temperaturas, aquecem o pneu e vulcanizam-no para que todos os componentes sejam devidamente ligados e a borracha curada (APA, 2012b; Goodyear, 2012). A Figura 2.3 ilustra os componentes envolvidos na montagem de um pneu de um veículo pesado.

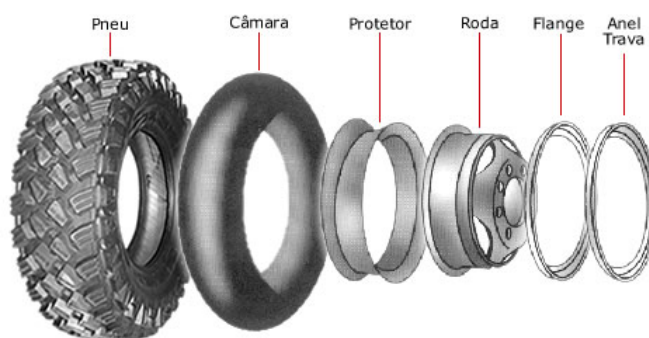


Figura 2.3 - Componentes da montagem do pneu (Ost, 2011)

A vulcanização da borracha consiste no aquecimento da borracha, juntamente com enxofre e óxidos metálicos, a elevadas temperaturas, por períodos de tempo prolongados, dependendo do tamanho do próprio pneu (APA, 2012b). A borracha não vulcanizada não apresenta a mesma resistência, não recupera a sua forma após sofrer uma deformação e apresenta uma consistência pegajosa (Mark, 2013).

A inspecção é a ultima etapa a que o pneu está sujeito. Alguns dos defeitos dos pneus podem ser detectados através do tacto e da visão experiente de um inspetor. No entanto, máquinas específicas auxiliam a inspecção permitindo que se verifique as condições do interior do pneu, assim o pneu pode ser submetido a raio-X de modo a sejam detectadas falhas internas. Os engenheiros de controlo de qualidade auxiliam também neste processo, cortando pneus seleccionados e estudando cada detalhe da construção que possa afectar o desempenho, a condução e sobretudo a segurança.

Se por acaso, algum pneu aparentar algum defeito, por mais pequeno que seja, este é imediatamente rejeitado (APA, 2012b; Goodyear, 2012).

2.1.3 Uso e fim de vida do pneu

A necessidade de fazer deslocar pessoas e bens leva a que, hoje em dia, o sector automóvel seja o maior consumidor de pneus. No entanto, as deslocações não são feitas apenas com recurso ao automóvel. Além destes, os meios aéreos têm também um elevado consumo de pneus, pois, sem eles, o enorme impacto provocado pelo contacto com a pista na aterragem não seria absorvido. Da mesma forma o transporte terrestre beneficia em larga escala com o uso dos pneus, sendo que é utilizado por todos os veículos, desde bicicletas aos camiões sendo também utilizado naturalmente pelo motociclos e automóveis. Até os transportes ferroviários tiram partido das características da borracha do pneu, pois aplicam-na nas rodas de modo a amortecer o rolamento nos carris (ETRMA, 2011).

Assim, os pneus são utilizados em veículos motorizados, aeronaves, velocípedes e outros equipamentos, motorizados ou não, que os contenham. De uma forma geral, as principais funções do pneu passam por terem capacidade de suporte de cargas elevadas, por garantirem direcção ao veículo e contribuem em grande parte na suspensão dos veículos, conferindo-lhes um maior conforto e segurança durante a deslocação, têm ainda uma elevada resistência ao rompimento.

Durante o período de utilização dos pneus, enquanto componente fundamental de um veículo, são gerados alguns impactes ambientais que, segundo Hird (2002), passam pela geração de ruído, resistência ao rolamento e perdas de borracha.

Os pneus ao longo do seu uso devem estar sujeitos a uma manutenção regular e adequada. Mas como todos os produtos, há uma altura em que estes já não reúnem as condições necessárias que garantam estabilidade, conforto e segurança, características típicas do pneu. Nesta situação, são considerados pneus usados e, tal como vem definido na alínea b) no artigo 2º do Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, os pneus usados são quaisquer pneus cujo respectivo detentor se desfaça ou tenha a intenção ou obrigação de se desfazer (APA, 2012b).

Estes pneus deverão ser encaminhados para diferentes formas de valorização deste resíduo, que passam pela recauchutagem, reciclagem ou valorização energética. Tendo em conta que os pneus contêm substâncias poluentes e embora seja proibido por lei, é importante assegurar que os pneus em fim de vida não são abandonados nem queimados a céu aberto, para se evitar a libertação dessas substâncias para a atmosfera (APA, 2012b).

Após a sua utilização, os pneus podem ainda ter outras aplicações em diferentes sectores. A engenharia civil recorre a pneus de diferentes granulometrias, desde inteiros até ao granulado para incluir, por exemplo, nas protecções costeiras, na construção de barreiras contra erosão, recifes

artificiais, como material de base na construção de ferrovias e, de aterros. Quando o diâmetro do granulado é mais pequeno, normalmente em pó, este pode ser aplicado em relvados sintéticos constituintes de campos de futebol, ou asfalto (ETRMA, 2011).

2.1.4 Valorização dos pneus usados

A problemática da deposição de pneus acompanha o Homem desde o aparecimento do pneu até à atualidade (Jang, 1998), sendo tão grande como visível. Encontramos pneus acumulados em *stocks* fora dos parâmetros legais, abandonados em florestas ou terrenos vazios. Desta forma existiu uma necessidade de criar instrumentos de gestão cujo principal objectivo passa pela prevenção e redução de depósitos ilegais de pneus. Esta acção resulta, essencialmente, na valorização de pneus usados que, tal como o Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, refere, diz respeito a:

(...) operações que visem a utilização de pneus usados para outros fins que não os iniciais, nomeadamente a reciclagem de pneus, a valorização energética, bem como a sua utilização em trabalhos de construção civil e obras públicas, a sua utilização como protecção de embarcações, molhes marítimos ou fluviais e no revestimento dos suportes de vias de circulação automóvel.

Sempre que possível, a recauchutagem deve ser aplicável, no entanto, quando tal não acontece, os pneus usados devem ser sujeitos a outras operações de valorização, desde que cumprindo a hierarquia de gestão referida na Directiva-Quadro dos Resíduos, DQR (Directiva n.º 2008/98/CE, de 19 de Novembro), que está transposta para o direito nacional pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, referida mais à frente no capítulo 2.3.1. Estas operações de gestão de valorização de pneus usados, quando a recauchutagem não é possível, e conforme a Inspeção-Geral da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território, IGAOT, (2005) faz referência no Relatório de Actividades de 2005, são essencialmente:

- A reciclagem – utilizar o granulado de borracha como aditivo para produção de peças de plástico conferindo-lhes elasticidade; no fabrico de diversos produtos a partir de borracha como calçado, capas, tapetes para parque infantis; na aplicação em campos de golfe e futebol; nos pavimentos industriais como isolante;
- A valorização energética;
- A pirólise (destilação destrutiva);
- A utilização em trabalhos de construção civil e obras públicas;
- A utilização como protecções de embarcações, molhes marítimos ou fluviais;
- O revestimento dos suportes dos separadores de vias de circulação automóvel.

Recauchutagem

Tendo em conta o panorama actual relativo à utilização massiva de veículos motorizados é eminente adoptar estratégias para, por um lado, reduzir o impacto dos custos operacionais totais, nomeadamente os custos em combustível e, por outro, implementar soluções para os pneus em fim de vida, que assumem um problema global com potencial crescimento e efeito cumulativo. Desta forma, é essencial o recurso às inovações tecnológicas ligadas aos pneus, sendo um deles a recauchutagem.

A recauchutagem é um processo que possibilita prolongar a vida útil do pneu usado (ETRMA, 2011e). Consiste, essencialmente, no aproveitamento da estrutura resistente do pneu gasto e na fusão de uma nova borracha de piso (Figura 2.4). Este processo permite manter as mesmas características técnicas e o mesmo comportamento de um pneu novo (banda de rodagem) (APA, 2012b).



Figura 2.4 - Pneu usado no processo de recauchutagem (Seiça, 2005)

De acordo com a APA (2012), no processo da recauchutagem poupam-se cerca de 75% em matérias-primas e energia traduzindo-se em vantagens, quer económicas, quer ambientais, o que advém de ser possível submeter o pneu a repetidas reconstruções desde que sejam mantidas as características base do pneu original. A maioria dos agentes económicos e utilizadores particulares recorre à recauchutagem, particularmente nos países economicamente desenvolvidos, em busca de uma maior competitividade económica baseada na segurança do processo e na viabilidade ambiental (Seiça, 2005).

Existem dois processos de recauchutagem, comumente denominados como “processo a frio” e “processo a quente”. Neste último, é aplicada a borracha sobre o pneu raspado, e este colocado num molde individual que definirá o desenho do piso pretendido (IGAOT, 2009). O aquecimento do molde é feito a vapor, a temperaturas elevadas (superiores a 130 °C), permitindo a vulcanização da

borracha. No processo a frio, o piso é pré-vulcanizado e cortado à medida, seguidamente o pneu é colocado num autoclave para vulcanização. Os ciclos de pressão e temperatura (110 °C a 130 °C) a que os pneus são sujeitos asseguram a adesão do piso à sua carcaça (IGAOT, 2009). Ao nível de impacte ambiental é de salientar que o processo a frio tem um menor consumo de energia, comparativamente com o processo a quente, o que leva à adopção e substituição cada vez mais frequente do processo a quente pelo processo a frio. Desta forma, é mais comum ser aplicado o processo a frio.

Reciclagem

Os pneus usados são utilizados como matéria-prima pelos recicladores cujo interesse se prende com a borracha vulcanizada que, após o devido processamento, dá origem a diferentes produtos finais, os quais têm posteriormente diversas aplicações (Valorpneu, 2012i). Os produtos finais são essencialmente granulado de borracha com diferentes granulometrias, e o têxtil, os quais podem ter diversas aplicações como, por exemplo, pavimentos de campos polidesportivos, pisos de parques infantis, campos de futebol sintéticos ou ainda betume modificado para pavimentação de estradas (APA, 2012b). Em relação aos restantes produtos, o aço é normalmente vendido a empresas que processam metais, e o têxtil era depositado, até há pouco tempo, em aterro. Porém, actualmente, também este é passível de valorização energética (Valorpneu, 2012i).

Os processos mais comuns de reciclagem de pneus usados são o processo mecânico e o processo criogénico. O primeiro consiste na trituração mecânica dos pneus, onde a borracha é fragmentada por uma série de trituradoras e moinho, o aço é separado por separação magnética e o têxtil por diferença de densidade. De seguida, o granulado de borracha é separado através de crivos com diferentes dimensões de malha e agrupados (Valorpneu, 2012i).

No segundo processo, o criogénico, após os pneus usados sofrerem uma trituração mecânica, passam por um túnel criogénico onde são submetidos a azoto líquido, a uma temperatura aproximadamente de -160° C, para congelar a borracha e fragmentá-la de uma forma mais homogénea. Após a passagem pelo túnel criogénico e martelos pneumáticos, os restantes constituintes dos pneus, o aço e o têxtil, são separados da borracha por separação magnética e aspiração, respectivamente (Valorpneu, 2012i).

Valorização energética

A valorização energética é uma das técnicas de gestão de pneus usados referida no Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, que se refere à gestão de pneus usados. Segundo o mesmo Decreto-Lei, a valorização energética visa a “ (...) utilização de pneus usados como combustível alternativo para a produção de electricidade e vapor em unidades de co-geração, devido ao seu elevado poder

calorífico”, aproximadamente 5700 kcal/kg, sendo ligeiramente inferior ao do carvão que é de 6800 kcal/kg (Valorpneu, 2013a). Os pneus usados representam uma alternativa como combustível complementar e podem ainda ser utilizados na produção de cimento, cal, papel, aço e na incineração de resíduos (The Basel Convention, 1999).

A incorporação de pneus usados, nestes sistemas produtivos, apesar de conterem menos energia que o carvão, é ambientalmente vantajosa, face à utilização de combustíveis fósseis, pois as emissões geradas, desde que devidamente controladas, contêm menores percentagens de enxofre e óxidos de azoto, (Convention, 1999; BLIC, 2003; Valorpneu, 2013b).

2.2 Produção e mercado dos pneus usados

A estimativa de produção anual de pneus, a nível mundial, ronda os 1,5 mil milhões de unidades, sendo que as taxas de recuperação de pneus usados sofreram um aumento exponencial na Europa, EUA e Japão, ao longo dos últimos 17 anos. Paralelamente, o aumento da eficiência em estruturas de gestão e novas vias de recuperação permitiram que o custo da reciclagem para o consumidor diminuísse (ETRMA, 2011a).

Com o aumento da produção de pneus surge consequentemente o aumento de pneus usados. Cerca de 3,3 milhões de toneladas de pneus usados (incluindo pneus usados para a recauchutagem e reutilização/exportação) foi a quantidade com que a Europa se deparou, no ano de 2010, confrontando-a com o desafio de geri-los de forma ambientalmente correcta (ETRMA, 2011a).

Na UE existem milhões de pneus usados depositados em aterros, alguns de forma ilegal ou armazenados. A sua deposição inadequada representa, na maioria dos casos, uma potencial ameaça para a saúde pública, essencialmente ao nível de ocorrência de criação de habitats para roedores, pragas e mosquitos, e, por sua vez, aumenta os riscos ambientais. Embora a Europa tenha uma estimativa de custos anuais com a gestão de pneus usados de cerca de 600 milhões de euros, situações como estas ainda acontecem (ETRMA, 2011a). A estimativa actual do *stock* de pneus usados por toda a Europa ronda os 5,7 milhões de toneladas. Porém, a recente melhoria do desempenho económico no sector de pneus usados deveria conduzir a uma antecipação e uma maior eficácia ao combate do armazenamento ilegal (ETRMA, 2011a).

Relativamente à geração de pneus usados, são países como a Alemanha, o Reino Unido, a França, a Itália, a Espanha e a Polónia que apresentam os maiores volumes de pneus usados com valores entre 250 e 600 mil toneladas por ano. No que diz respeito à recuperação, 23 países da UE27, Noruega e Suíça, alcançaram taxas de 90%. Em 18 destes 23 países conseguiram-se recuperar 100%, e países como Itália e República Checa alcançaram taxas entre os 70% e 90%. Existem apenas dois países na Europa, Bulgária e Chipre, que estão dependentes de aterros para deposição de pneus usados. Nos países que aplicam o sistema de responsabilidade do produtor há

mais de 10 anos, como é o caso dos países nórdicos, as taxas de recuperação atingem mesmo os 100% e as deposições ilegais foram eliminadas (ETRMA, 2011a).

Embora estas taxas sejam algo díspares, em 2010 os 27 países da UE, Noruega e Suíça, atingiram uma média de 96% relativamente à taxa de recuperação, sendo esta taxa notável quando comparada com outros sectores como o papel (69%) e o plástico (58%) (ETRMA, 2011a).

Em Portugal, no ano 2010, a quantidade de pneus colocados no mercado e o volume de pneus usados gerados aumentou face ao ano anterior (Valorpneu, 2011). Relativamente ao ano 2011, os pneus que foram colocados no mercado sofreram um decréscimo significativo face ao ano transacto. A principal razão, que justifica esta redução, deve-se ao crítico quadro macroeconómico que o país atravessa com forte retracção do consumo privado e do investimento, embora a Valorpneu tenha mantido o esforço para adquirir novos produtores (Valorpneu, 2012j).

A maior parte dos custos suportados pela Valorpneu, em 2010, referem-se a custos com os operadores do SGPU relacionados com a logística e o tratamento de pneus usados, em todas as fases do processo (armazenamento, transporte, fragmentação, reciclagem e valorização energética). Este tipo de custos representam cerca de 87% dos custos operacionais sendo que destes, 18,8% correspondem aos pontos de recolha e 19,5% corresponde ao transporte. Na fase de valorização, os custos com a reciclagem atingem taxas mais expressivas com 36,2% dos custos totais, visivelmente superior aos custos com a valorização energética e fragmentação, que representam cerca de 7% e 5%, respectivamente (Valorpneu, 2011).

No ano de 2011, a evolução dos resultados económicos da Valorpneu foram inferiores relativamente ao ano anterior, dado que as quantidades absolutas declaradas à Valorpneu, referentes aos pneus colocados no mercado e dos pneus abrangidos pelo SGPU, foram inferiores. Assim, este défice de exploração em 2011 resulta da redução acentuada nos rendimentos obtidos do Ecovalor, cobrado pela Valorpneu, que não pôde ser compensada com a redução ao nível dos gastos totais do SGPU (Valorpneu, 2012j).

2.3 Enquadramento Legal

2.3.1 Legislação Comunitária

Tem-se notado, por parte da sociedade, um aumento da consciência relativamente à preservação do ambiente, à extracção excessiva de matérias-primas e às consequências que advêm da deposição de resíduos em aterro (Campos, 2006). Consequentemente, os vários governos sentiram necessidade de começar a desenvolver legislação para poderem controlar as fases do ciclo de vida dos produtos e a colmatar falhas na gestão de resíduos, respondendo desta forma às preocupações ambientais ao nível global (Chang *et al.*, 2013).

Segundo Chang *et al.* (2013), a legislação da UE assenta essencialmente em Directivas, Regulamentos e Decisões, sendo que as primeiras se referem apenas a objectivos e metas que deverão ser atingidas, competindo a cada Estado-Membro (EM) escolher o método que vai implementar para atingir esses objectivos e metas. Os regulamentos, por sua vez, têm de ser aplicados por todos os EM, e as decisões são definidas como sendo “obrigatórias na sua totalidade, àqueles a quem se dirige”. Existem ainda as estratégias onde são definidas as principais linhas de orientação, no entanto são meras indicações da UE (Chang *et al.*, 2013).

Durante a transposição das Directivas Europeias, os países da UE podem não possuir legislação específica sobre os resíduos, ou podem já ter legislação para a sua gestão. As transposições das Directivas trazem mais consequências além das legais, determinando igualmente as responsabilidades dos *stakeholders*, bem como os seus direitos e deveres (Chang *et al.*, 2013).

Na Tabela 2.4 apresenta-se, de forma resumida, os documentos legais existentes, a nível europeu e nacional sobre a gestão dos resíduos, directa ou indirectamente relacionados com os pneus usados.

Tabela 2.4 – Legislação em vigor relativa à gestão de pneus usados

	Âmbito	Europeia	Nacional
Geral	Directiva-Quadro de Resíduos	Directiva n.º 2008/98/CE, de 19 de Novembro	Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho
	Deposição de Resíduos em aterro	Directiva n.º 1999/31/CE, de 26 de Abril	Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto
	Veículos em Fim de Vida	Directiva n.º 2000/53/CE, de 18 de Setembro	Decreto-Lei n.º 196/2003, de 23 de Agosto
	Incineração de Resíduos	Directiva n.º 2000/76/CE, de 4 de Dezembro	Decreto-Lei n.º 85/2005, de 28 de Abril
Específica	Princípios e normas na gestão de pneus usados		Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril
			Decreto-Lei n.º 43/2004, de 2 de Março
	Pneus Recauchutados		Decreto-Lei n.º 80/2002, de 4 de Abril
			Decisão n.º 2001/509/CE, de 26 de Junho - Regulamento n.º 108
			Decisão n.º 2001/507/CE, de 26 de Junho – Regulamento n.º 109
			Decreto-Lei n.º 9/2002, de 4 de Abril
			Decreto-Lei n.º 10/2002, de 4 de Abril

Relativamente à gestão de pneus usados, não existe a nível Europeu, como se pode observar na Tabela 2.4, nenhuma legislação específica sobre a gestão deste fluxo específico. No entanto, algumas Directivas Europeias fazem referência a este fluxo, ainda que de forma indirecta.

A UE tem desenvolvido instrumentos económicos e regulamentares para orientar e fomentar a gestão dos resíduos de forma mais eficiente, por parte dos EM. A Directiva-Quadro de Resíduos (DQR), Directiva n.º 2008/98/CE, de 19 de Novembro de 2008, determina as medidas de protecção do ambiente e da saúde humana, de modo a prevenir ou reduzir os impactes adversos resultantes da geração e gestão de resíduos, melhorando a eficiência dessa utilização. Interessa destacar algumas definições que constam da DQR, e no Decreto-lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, tais como:

- **Resíduos:** quaisquer substâncias ou objectos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer;
- **Reutilização:** qualquer operação mediante a qual produtos ou componentes que não sejam resíduos são utilizados novamente para o mesmo fim para que foram concebidos;

- Valorização: qualquer operação cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico, ou a preparação dos resíduos para esse fim, na instalação ou conjunto da economia;
- Reciclagem: qualquer operação de valorização através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais, ou substâncias para o seu fim original ou outros fins. Inclui o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento.

Nesta Directiva é definida a hierarquia dos resíduos que é aplicável enquanto princípio geral da legislação e da política de gestão de resíduos. Todos os EM devem respeitar a seguinte hierarquia para as opções de gestão dos seus resíduos, assegurando que todo o procedimento de gestão é completo e transparente:

1. Prevenção e redução;
2. Preparação para a reutilização;
3. Reciclagem;
4. Outros tipos de valorização (e.g. valorização energética);
5. Eliminação.

A DQR introduz o conceito de fim do estatuto de resíduo, de acordo com o qual determinados resíduos específicos podem deixar de ser classificados como resíduos, caso tenham sido sujeitos a uma operação de valorização, incluindo a reciclagem, satisfazendo critérios específicos, designadamente:

- a) A substância ou objecto ser habitualmente utilizada para fins específicos;
- b) Existir um mercado de procura para essa substância/produto
- c) A substância/objecto satisfazer os requisitos técnicos e respeitar a legislação e as normas aplicáveis ao produto;
- d) A sua utilização não acarretar impactes adversos do ponto de vista quer ambiental quer da saúde humana.

Pode ainda ser necessário que os critérios incluam valores-limite para os poluentes e tenham em conta os possíveis efeitos ambientais adversos da substância ou objecto. No ponto n.º 2 do artigo 6º da DQR é referido que “deverão ser considerados critérios específicos para o estabelecimento do fim do estatuto de resíduo, nomeadamente para (...), pneus (...)”. Consequentemente, de acordo com o ponto n.º 3 do mesmo artigo da legislação é ainda referido que:

Os resíduos que deixarem de ser resíduos nos termos dos n.os 1 e 2 deixam também de ser resíduos para efeitos dos objectivos de valorização e de reciclagem fixados nas Directivas 94/62/CE, 2000/53/CE, 2002/96/CE e 2006/66/CE e demais legislação comunitária aplicável, quando forem cumpridos os requisitos em matéria de reciclagem e de valorização impostos por essa legislação.

Além da Directiva supracitada, a Directiva n.º 1999/31/CE, de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterro, a qual estabelece, no artigo 5º que, até 2006, os EM deverão garantir que não são depositados em aterro pneus inteiros, sendo que apenas podem ser depositados pneus fragmentados, pneus de bicicleta e pneus com diâmetro superior a 1400 mm, bem como pneus utilizados como materiais de fabrico do próprio aterro.

2.3.2 Legislação Nacional

No panorama nacional, o Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, transpõe a Directiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro, relativa aos resíduos, introduzindo alterações a diversos diplomas legais relativos a esta temática, nomeadamente ao Regime Geral da Gestão de Resíduos. Neste documento legal é dada prioridade, no que diz respeito à gestão de resíduos, à redução, reutilização e reciclagem e por último à eliminação. Porém, para alguns resíduos, designadamente, os fluxos específicos (*i.e.* embalagens, óleos usados, pneus usados, pilhas e acumuladores, equipamentos eléctricos e electrónicos) esta ordem de prioridades pode não ser seguida, desde que as opções adoptadas se justifiquem pela aplicação do conceito de ciclo de vida aos impactes globais da produção e gestão dos resíduos em causa, tal como é descrito no ponto n.º 2 do artigo 7º. Sempre que isto se verificar, os princípios gerais de protecção do ambiente, da precaução e da sustentabilidade, viabilidade técnica e económica, impactes na saúde humana e sociais deverão ser tidos em conta (ponto n.º 3, artigo 7º).

Segundo o mesmo Decreto-Lei, o mercado organizado é alargado aos resíduos de materiais e resíduos reciclados e subprodutos de forma a consolidar a valorização dos resíduos, sendo vantajoso para os agentes económicos, e a estimular o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização.

Passa a ser obrigatório registar no Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente (SIRAPA), disponível na página da *online* da APA, informação sobre:

- A produção e gestão de resíduos;
- Os produtos colocados à venda que, no seu final de vida, dêem origem a resíduos com regras de gestão específicas.

A Directiva n.º 1999/31/CE do Conselho, relativa à deposição de resíduos em aterro e que estabelece a proibição da deposição de pneus usados em aterros, foi transposta para o direito interno português através do Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio, revogado pelo Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto.

De modo a satisfazer a necessidade de gestão de pneus usados, foi publicado o Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, que estabelece os princípios e normas aplicáveis à gestão de pneus e pneus usados, actuando ao nível da prevenção da produção destes resíduos, privilegiando a recauchutagem (operação de preparação para a reutilização), a reciclagem e outras técnicas de valorização, de forma a reduzir a quantidade de resíduos a eliminar, bem como a melhorar o desempenho ambiental de todos os intervenientes durante o ciclo de vida dos pneus. Este Decreto-Lei é aplicável a todos os pneus colocados no mercado nacional e a todos os pneus usados, de acordo com as definições presentes nas alíneas a) e b) no artigo 2º:

- Pneus: os pneus utilizados em veículos motorizados, aeronaves, reboques, velocípedes e outros equipamentos, motorizados ou não, que os contenham;
- Pneus Usados: quaisquer pneus de que o respectivo detentor se desfaça ou tenha intenção ou obrigação de se desfazer, que constituam resíduos (...) ainda que destinados a reutilização (recauchutagem).

O mesmo documento legal, o Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, refere ainda as seguintes definições:

- Recauchutagem: operação pela qual um pneu já utilizado, após cumprir o seu ciclo de vida para o qual foi projectado e concebido, é reconstruído de modo a permitir a sua utilização para o mesmo fim para que foi concebido;
- Pneu recauchutado: o pneu usado que é objecto de processo industrial de acordo com as especificações técnicas aplicáveis, com vista à sua reutilização, sendo de novo colocado no mercado;
- Reciclagem: o processamento de pneus usados para qualquer fim, que não o inicial, nomeadamente como matéria-prima, excluindo a valorização energética;
- Valorização: operação que visa a utilização de pneus usados para outros fins que não os iniciais, nomeadamente a reciclagem de pneus usados, a valorização energética, bem como a sua utilização em trabalhos de construção civil e obras públicas, a sua utilização como protecção de embarcações, molhes marítimos ou fluviais e no revestimento dos suportes dos separadores de vias de circulação automóvel.

O Decreto-Lei n.º 43/2004, de 2 de Março, que altera o Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, clarifica o cálculo dos objectivos de gestão quer da recolha quer da recauchutagem, as regras para a comercialização de pneus, nomeadamente a introdução da obrigatoriedade do valor de contrapartida financeira fixada a favor da entidade gestora, o “ecovalor”, sendo discriminado na factura de venda ao consumidor, e recolha de pneus usados, em que cabe aos distribuidores receberem gratuitamente os pneus usados aquando da venda de pneus novos.

O mesmo Decreto-Lei introduziu objectivos e metas específicas para a recolha, recauchutagem e valorização de pneus usados, para 2003 e 2007, tal como descritos na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Objectivos nacionais de gestão para os pneus usados, de acordo com Decreto-Lei n.º 111/2001, alterado pelo Decreto-Lei n.º 43/2004 (APA, 2012a)

Metas	Janeiro de 2003	Janeiro de 2007
Cessação da deposição de pneus usados em aterro	✓	✓
Recolha de pneus usados, na proporção de:	85% dos pneus gerados por ano	95% dos pneus gerados por ano
Recauchutagem de pneus usados, na proporção de:	25% dos pneus gerados por ano	30% dos pneus gerados por ano
Valorização da totalidade dos pneus recolhidos e não recauchutados, dos quais, no mínimo,	60% dos pneus gerados por ano	65% dos pneus gerados por ano

Este diploma refere ainda, a necessidade de implementar circuitos de recolha de pneus usados, de modo a garantir que os pneus são devidamente triados para que seja possível recauchutar, reciclar ou valorizar. Embora os distribuidores tenham a responsabilidade de receber os pneus usados a custo zero, a gestão dos pneus usados é feita através de um sistema integrado que, segundo a definição no artigo 2º do Decreto-Lei n.º43/2004 “pressupõe a transferência de responsabilidade, pela gestão dos pneus usados, para uma entidade gestora devidamente licenciada”.

A Comissão Europeia, no âmbito da Decisão n.º 2001/509/CE, de 26 de Junho, aderiu ao Regulamento n.º 108 da Comissão Económica para a Europa das Nações Unidas relativo à homologação da produção de pneumáticos recauchutados para veículos automóveis e seus reboques, tendo também aderido ao Regulamento n.º 109, através da Decisão n.º 2001/507/CE, de 26 de Junho, relativo à homologação do fabrico de pneus recauchutados a utilizar nos automóveis de mercadorias, pesados de passageiros e respectivos reboques. Ambos os Regulamentos encontram-se aprovados na legislação nacional pelos Decreto n.º 9/2002 e Decreto n.º 10/2002, a 4 de Abril, e são de extrema importância para garantir a qualidade dos pneus recauchutados e a segurança rodoviária. Como tal, é fulcral definir as infracções e suas sanções para a produção ou utilização de pneus recauchutados que não obedeçam às regras constantes nestes Regulamentos. Em consequência, a Direcção-Geral de Viação é designada, pelo Decreto-Lei n.º 80/2002, de 4 de Abril, como entidade nacional competente para a concessão da homologação do fabrico de pneus recauchutados para automóveis de mercadorias, passageiros e reboques em Portugal.

2.4 Sistemas de gestão de pneus usados

De acordo com a definição descrita do Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, os pneus são utilizados em veículos motorizados, aeronaves, reboques, velocípedes e outros equipamentos, quer sejam motorizados ou não, que os tenham na sua constituição. Assim, os pneus passam a ter o estatuto de resíduo a partir do momento em que o seu detentor se desfaça, tenha intenção ou ainda seja obrigado a fazê-lo.

2.4.1 Sistemas de gestão de pneus e pneus usados a nível europeu

Os EM têm de atingir as metas estabelecidas pela UE, através da transposição de Directivas Europeias para a legislação nacional, bem como têm a liberdade para criar todo o tipo de iniciativas que lhes permita atingir tal objectivo (ETRMA, 2011), garantindo que as condições de exigências são semelhantes entre os países da UE.

No caso dos pneus usados, a responsabilidade da sua gestão varia entre os países da UE, tal como se pode observar na Figura 2.5. Actualmente, na UE existem três tipos de sistema: (1) Responsabilidade do Produtor; (2) Sistema de Taxas; (3) Sistema de Mercado Livre (ETRMA, 2011).



Figura 2.5 - Sistemas integrados de gestão de pneus usados na Europa e respectivas entidades gestoras (adaptado de ETRMA, 2011)

Responsabilidade do Produtor

A atribuição de responsabilidade é feita através do princípio da Responsabilidade Alargada do Produtor ou, como surge na terminologia anglo-saxónica, *Extended Producer Responsibility* (EPR) (Chang *et al.*, 2013). Este princípio atribui ao produtor a responsabilidade pelos impactes dos materiais e produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida, em particular no fim-de-vida.

De forma a assegurar que os resíduos seguem o destino correcto, foram criadas organizações sem fins lucrativos, entidades gestoras, financiadas pelos produtores, importadores e transportadores de pneus, sendo esta entidade responsável por financiar toda a gestão e recolha de resíduos, procurando a recuperação dos pneus em fim-de-vida através de soluções mais económicas (ETRMA, 2011). As autoridades locais e os distribuidores do produto ficam responsáveis pelo encaminhamento dos resíduos para um destino final, quer seja reciclagem, valorização energética ou armazenamento, consoante o que a entidade gestora definir.

Por sua vez, esta entidade tem de reportar toda a informação para a UE referente ao fluxo de determinado resíduo (Chang *et al.*, 2013). O facto de existir uma obrigatoriedade de comunicação com as autoridades garante uma maior transparência, sendo um sistema da preferência, quer dos fabricantes de pneus, quer do próprio consumidor final. A Figura 2.6 esquematiza a aplicação do sistema de responsabilidade do produtor aplicado à gestão dos pneus usados.

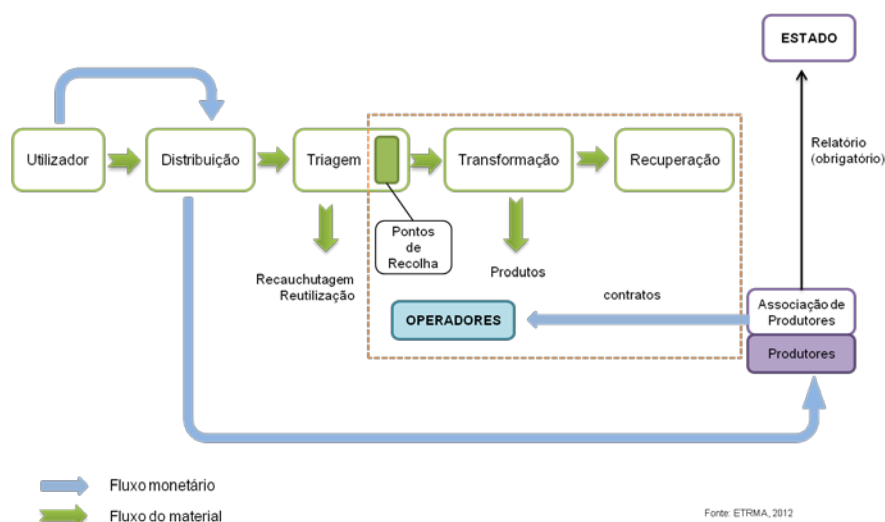


Figura 2.6 - Sistema de responsabilidade do produtor (adaptado de (ETRMA, 2011))

Conforme demonstra a Figura 2.5, além de Portugal, grande parte dos países da UE, como Bélgica, Finlândia, Hungria, Holanda, Noruega, Polónia, Roménia, Espanha, Suécia e Turquia

recolhem pneus usados segundo este sistema de gestão, representando, de acordo com a *European Tyre & Rubber (ETRMA)*, 44% dos países onde a responsabilidade é do produtor. Esta percentagem aumentou para 57%, em 2011, na consequência da adesão da Itália a este sistema (ETRMA, 2011).

Sistema de Taxas

No sistema de taxas, cada país é responsável pela recolha e encaminhamento para destino final dos pneus usados. Países como Dinamarca, Eslovénia e Eslováquia, são financiados através da cobrança de uma taxa na produção e venda de pneus, uma vez que os produtores pagam essa taxa ao Estado, é da sua responsabilidade organizar e financiar toda a cadeia de recolha, tratamento, e deposição final dos pneus usados gerados, como é esquematizado na Figura 2.7.

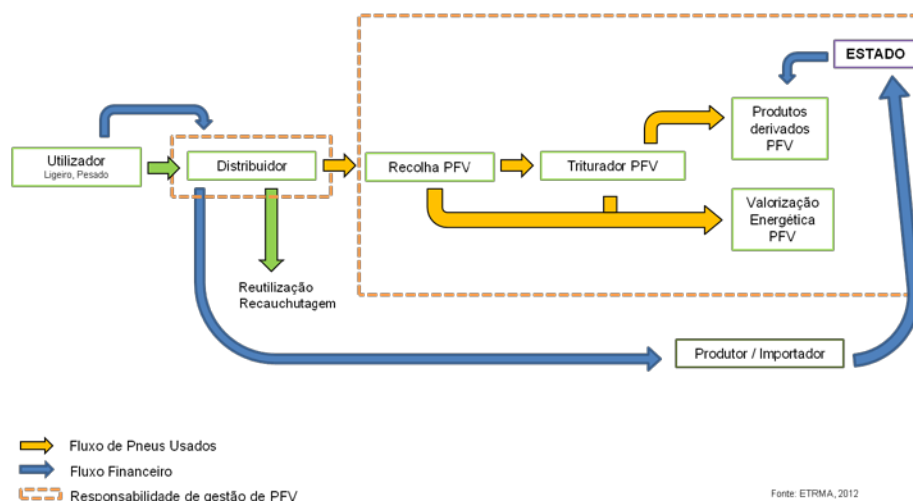


Figura 2.7 – Esquema do sistema de taxas (adaptado de ETRMA, 2011)

Sistema de Mercado Livre

Neste sistema de gestão, as metas são estabelecidas por legislação, no entanto não são determinadas as responsabilidades, assim, as empresas operam de forma independente. Em países como Áustria, Bulgária, Croácia, Alemanha, Irlanda e Suíça são as próprias empresas que organizam a reciclagem e valorização dos pneus em fim-de-vida, desde que existam infraestruturas apropriadas a estes processos, e em conformidade com a legislação. Em todo este processo pode ser envolvida a participação voluntária de outros agentes da indústria (ETRMA, 2011).

2.4.2 Sistema nacional de gestão de pneus e pneus usados

Em Portugal foi criada, em 2002, uma entidade gestora para o fluxo de pneus usados, a Valorpneu – Sociedade de Gestão de Pneus Lda. Trata-se de uma sociedade por quotas, sem fins lucrativos, constituída por três associações: a ACAP – Associação do Comércio Automóvel de Portugal representando 60% do capital, a ANIRP – Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneus, representando 20% do capital, e a APIB – Associação Portuguesa dos Industriais de Borracha, representando os restantes 20% (APA, 2012a).

Os Ministérios da Economia e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente conceberam à Valorpneu a primeira licença, válida por cinco anos, em Outubro de 2002, atribuindo-lhe a responsabilidade de criar e implementar o Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados (SGPU) para assegurar a gestão deste fluxo em território continental, tal como preconizado pelo Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril (Valorpneu, 2011).

Assim, e no âmbito do SGPU gerido pela Valorpneu, que entrou em funcionamento em Fevereiro de 2003, é obrigação de qualquer empresa que produza ou importe pneus, sejam eles novos ou usados, celebrar um contrato com a Valorpneu. Cada pneu introduzido no mercado nacional deverá pagar o Ecovalor, taxa que é cobrada pelos produtores de pneus e que serve para financiar todo o SGPU, bem como pagar a prestação do serviço prestado pela Valorpneu (Valorpneu, 2012j).

Para garantir o funcionamento do SGPU era conveniente a existência de locais centrais onde os pneus usados fossem armazenados controladamente sem riscos para o ambiente e saúde, de forma legal. Surgiram então os pontos de recolha que são, basicamente, locais de armazenamento temporários, que actualmente se encontram espalhados por todo o território nacional. Nestes pontos de recolha, qualquer entidade pública ou privada pode entregar, livre de encargos, qualquer tipo e quantidade de pneus (APA, 2012a; Vaorpneu, 2012j).

Na licença da Valorpneu é definido que deve ser garantida a existência de, pelo menos, 40 pontos de recolha de pneus usados em Portugal Continental, e cada distrito deve ter, no mínimo, um ponto de recolha (APA, 2012a). Os objectivos a cumprir por estes pontos de recolha são (Valorpneu, 2012j):

- i) Controlar e quantificar todos os fluxos de pneus usados encaminhados para valorização e restantes destinos;
- ii) Disponibilizar uma rede de recolha adequada e distribuída uniformemente por Portugal.

No final do primeiro ano de funcionamento, em 2003, a Valorpneu conseguiu criar uma rede com 28 pontos de recolha no continente, tendo este valor aumentado para 33, 34 e 36 nos três anos seguintes, respectivamente (APA, 2012a). Em 2006, no ano em que já todos os distritos do continente estavam cobertos pela rede de recolha, foi concedida à Valorpneu a licença de extensão da sua actividade às Regiões Autónomas da Madeira e Açores. Em ambas as Regiões o sistema

entrou em funcionamento em Maio de 2006, com a criação de 1 ponto de recolha na Madeira e 8 nos Açores.

De acordo com a Valorpneu (Valorpneu, 2011), o SGPU é um sistema articulado de processos e responsabilidades em que pretende que o encaminhamento dos pneus em fim-de-vida seja feito correctamente, promovendo a recolha, separação, retoma e por fim, a sua valorização. Todo este processo necessita de ser suportado financeiramente, de modo a que os pneus possam ser recolhidos e tenham o devido encaminhamento. A forma de financiamento encontrada foi através da cobrança de um Ecovalor, que é discriminado na factura aquando da venda de pneus (Valorpneu, 2011). A Figura 2.8 demonstra resumidamente o esquema do financiamento do SGPU.

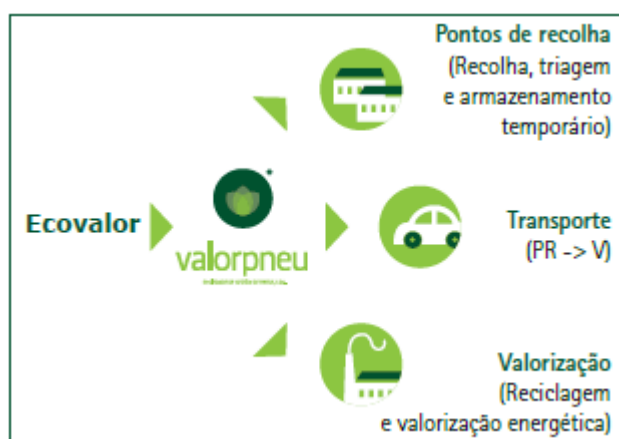


Figura 2.8 – Esquema do fluxo financeiro do SGPU (Valorpneu, 2011)

Os produtores/importadores de pneus têm que declarar à Valorpneu todos os pneus que colocam no mercado, e efectuar o pagamento do respectivo Ecovalor, mesmo que já tenha sido pago no país de origem, uma vez que cada país possui um sistema de gestão próprio (Valorpneu, 2012).

O Ecovalor é definido como sendo a prestação financeira, que varia consoante a categoria do pneu, e que possibilita que o SGPU se encontre em funcionamento. Este financiamento assegura todas as actividades de gestão de pneus usados, desde o armazenamento temporário nos pontos de recolha, ao transporte e valorização (Valorpneu, 2012f). O Ecovalor é repartido em toda a cadeia de comercialização, desde o produtor/distribuidor, até ao consumidor final, quando efectua a compra dos pneus ou veículos/equipamentos que os contenham, sendo que os produtores/distribuidores deverão discriminar na factura o valor correspondente ao Ecovalor pago pelo cliente (Valorpneu, 2012f).

O valor pago é proporcional ao peso dos pneus, e está dividido em 14 categorias diferentes, como se verifica na Tabela 2.6, cada uma com o seu próprio valor (Valorpneu, 2012j). Esta classificação leva em conta dois factores que afectam os custos de processamento dos pneus

usados, como a homogeneidade no peso do pneu e a classificação usada pelos recicladores, bem com a usada pelos produtores (Ferrão *et al.*, 2008).

Tabela 2.6 – Ecovalor cobrado aos produtores, em vigor desde de 2009 (Valorpneu, 2011; Valorpneu, 2012j)

Código	Categoria	Ecovalor €/pneu
T	Ligeiro de passageiro/Turismo	1,00
4x4	4x4 “on/off road”	1,99
C	Comercial	1,57
P	Pesado	7,81
A1	Agrícola (diversos)	2,55
A2	Agrícola (rodas motoras)	9,47
E1	Industrial (8” a 15”)	2,74
E2	Maciço (≤ 15 ”)	4,10
G1	Eng ^a . Civil e Maciços (< 24”)	8,91
G2	Eng ^a . Civil e Maciços (≥ 24 ”)	36,54
M1	Moto (> 50cc.)	0,67
M2	Moto (até 50cc.)	0,23
F	Aeronave	1,00
B	Bicicleta	0,07

De acordo com os dados do Relatório Anual & Contas de 2010, 2011 e 2012 da Valorpneu, a entidade gestora pagou aos operadores de gestão de resíduos, nesses anos, um valor de contrapartida de 25 € por tonelada de pneus recolhidos nos pontos de recolha (Valorpneu, 2011; Valorpneu, 2012j; Valorpneu, 2013). Tal como referido anteriormente, qualquer detentor de pneus usados, seja ele distribuidor, particular, ou mesmo as próprias oficinas automóveis, que pretenda desfazer-se de pneus usados pode fazê-lo sem qualquer custo, suportando apenas o custo de transporte até ponto de recolha mais próximo.

A partir do ponto de recolha até aos destinos de valorização, os transportadores asseguram o transporte necessário, sendo da responsabilidade da Valorpneu financiar e controlar todo o transporte (Valorpneu, 2012e). Os recauchutadores, recicladores e valorizadores energéticos recebem

igualmente um valor de contrapartida para processarem os pneus usados, de acordo com as metas estabelecidas, produzindo pneus recuperados, granulado de borracha ou energia, fechando-se assim o ciclo do SGPU (Valorpneu, 2012e).

O SGPU é considerado um sistema complexo com especificidades próprias, uma vez que engloba uma quantidade considerável de agentes económicos, entidades institucionais e diversos operadores. Do mesmo modo, inclui uma série de fluxos financeiros, de materiais e de informação.

A gestão da informação desta complexa rede de transmissão de dados é suportada por um sistema de informação *on-line*, assegurando a intervenção de todos os *stakeholders* do sistema (Valorpneu, 2012e).

Na licença concedida à Valorpneu encontra-se abrangido o apoio à sensibilização, investigação e desenvolvimento, ficando a entidade gestora encarregue de implementar um sistema de comunicação a fim de sensibilizar a totalidade dos agentes envolvidos na problemática da gestão dos pneus usados (ME/MCOTA, 2002). A sensibilização, de acordo com o mesmo documento, passa pela elaboração de planos de comunicação anuais, da iniciativa da Valorpneu (ME/MCOTA, 2002). Ao nível da investigação e desenvolvimento, todos os projectos de investigação e desenvolvimento destes processos deverão ser apoiados técnica e financeiramente pela entidade gestora.

O sistema está centralizado nos pontos de recolha que disponibilizam um armazém temporário para os pneus usados. Assim, qualquer detentor de pneus usados, ou distribuidor, pode descarregá-los, sem qualquer tipo de encargo, nesses mesmos locais ou pode ainda entregá-los directamente a um recauchutador.

O recauchutador, entrega as carcaças que não estão em condições de serem recauchutadas aos pontos de recolha, podendo também adquirir carcaças com capacidade para recauchutar nos pontos de recolha.

Os pneus usados que se encontram nos pontos de recolha são encaminhados pela Valorpneu até aos pontos de destino final, reciclagem ou valorização energética, de acordo com as metas estabelecidas (Valorpneu, 2012e). Na Figura 2.9 é possível observar como funciona o SGPU, gerido pela Valorpneu.

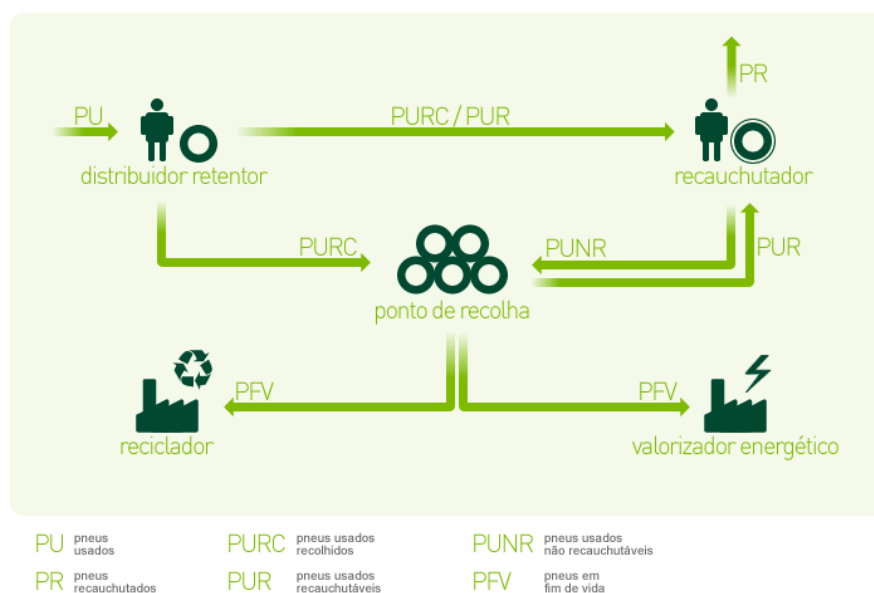


Figura 2.9 - Modelo de funcionamento do SGPU (Valorpneu, 2012e)

A quantidade de pneus usados produzidos em cada ano resulta da soma dos pneus de substituição vendidos nesse ano e dos pneus provenientes dos veículos em fim-de-vida nesse mesmo ano (Ferrão *et al.*, 2008). Relativamente ao funcionamento da Valorpneu, nos primeiros cinco anos de funcionamento foram colocados no mercado nacional cerca 454 000 pneus novos e usados (Valorpneu, 2012). Desde então que se tem verificado uma oscilação destes valores, tal como é possível constatar na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Resultados obtidos pela Valorpneu desde 2003 a 2011 (Valorpneu, 2012)

Resultados (t)	2003/2008	2008	2009	2010	2011
Pneus colocados no mercado	453 920	83 139	78 349	83 294	72 785
Quantidade total processada pelo SGPU	528 962	101 104	93 766	98 016	93 367

De acordo com a Valorpneu (2012j), em 2011 foram recolhidos e tratados cerca de 93 mil toneladas de pneus usados, no âmbito do SGPU, embora se tenha sentido uma oscilação na quantidade de pneus colocados no mercado, como mostra a Tabela 2.8. A Figura 2.10 ilustra a

evolução da quantidade de pneus processados e colocados no mercado desde que iniciou actividade até 2011. De igual forma, observa-se que a quantidade de existências actualmente processadas não atinge as 3 000 toneladas. Estas existências são pneus usados ou pedaços de pneus que se encontram abandonados à beira da estrada ou nas florestas, por exemplo. Estas têm vindo a ser processadas ao longo dos anos, tendo mesmo sido eliminado o passivo existente na Região Autónoma dos Açores. Comparando o Relatório Anual & Contas da Valorpneu de 2010 e de 2011 é possível verificar que na Região Autónoma da Madeira a quantidade de existências diminuiu grandemente.

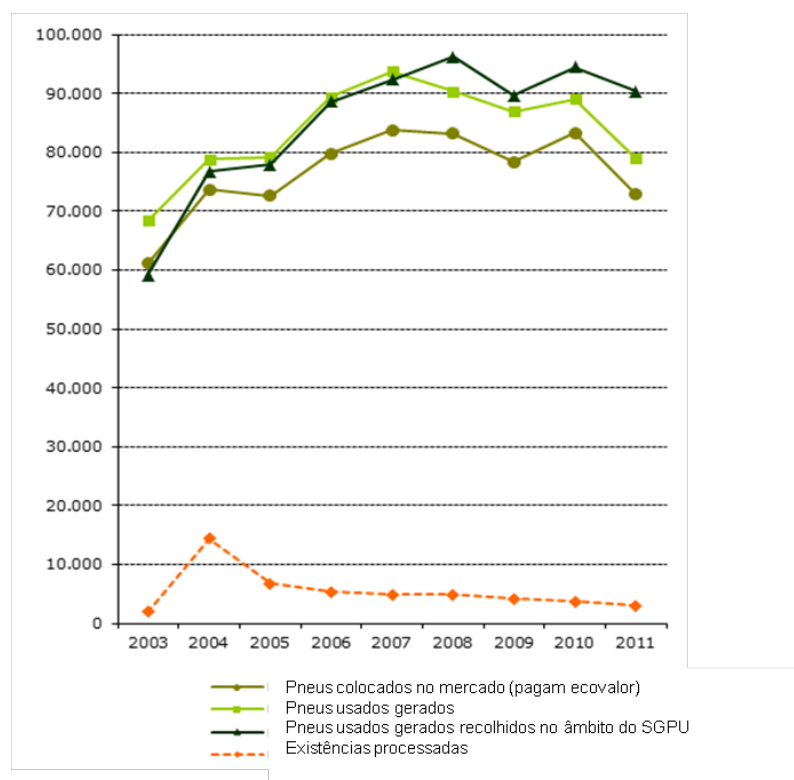


Figura 2.10 - Evolução da quantidade de pneus colocados no mercado, gerados, recolhidos e existentes (Valorpneu, 2012j)

Desde o ano 2008 até ao ano 2011, verifica-se alguma oscilação na quantidade de pneus usados processados, e colocados no mercado. Esta evolução pode ser justificada pela crise económica que abrange a Europa e em particular Portugal. O aumento verificado em 2010 resulta, segundo a Valorpneu, das novas adesões de produtores ao sistema, 1 191 produtores no final desse ano, bem como da compra de novos veículos consequência da perspectiva penalizadora do regime de fiscalidade em 2011 (Valorpneu, 2011). Ainda assim, no decorrente ano houve um aumento de produtores aderentes do SGPU, somando um total de 1 290 produtores no ano de 2011 (Valorpneu, 2012j).

2.5 Risco e impacte ambiental dos pneus usados

Os componentes da borracha que constituem os pneus formam redes tridimensionais de polímeros, que conferem uma grande estabilidade aos pneus enquanto componente de um veículo (The Basel Convention, 1999) e, aparentemente, não demonstra propriedades que sejam perigosas. Embora a borracha tenha grande estabilidade, é importante assegurar que o armazenamento, o tratamento e, no fundo, toda a gestão dos pneus em fim de vida, não cause impactes negativos, quer para o ambiente, quer para a saúde humana. Os pneus usados são um resíduo cuja compactação, recolha e eliminação é complexa e ocupam bastante espaço físico, bem como é desconhecido o seu tempo de degradação, dado que os compostos do pneu não são biodegradáveis (The Basel Convention, 2010).

É necessário ter em atenção o risco que uma má gestão de pneus usados pode ter para a saúde humana. A forma redonda dos pneus combinada com a sua impermeabilidade e outros detritos proporcionam locais perfeitos para o desenvolvimento de roedores e, essencialmente, mosquitos, conforme as condições climáticas. As pilhas de pneus armazenados facilitam o rápido crescimento de duas espécies de mosquitos, *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*, que são os principais vectores de doença da dengue e da febre-amarela (The Basel Convention, 2010). Estas adaptam-se muito bem às condições de temperatura e humidade que se verificam especialmente nas regiões tropicais e subtropicais, onde afectam milhares de pessoas. Um outro factor bastante preocupante está relacionado com a introdução de espécies não-nativas, resultante do inadequado armazenamento e posterior importação de pneus em fim de vida. Estas novas espécies são normalmente de difícil controlo e aumentam grandemente o risco de doenças (The Basel Convention, 2010).

Existem ainda outros riscos associados aos pneus usados, como por exemplo o risco de incêndio quando armazenados sem controlo, é um resíduo não biodegradável, apresenta risco de acumulação de bolsas de ar que em contacto com o metano pode ser explosivo, e nos aterros que se encontram ao abandono os pneus usados representam um recurso não aproveitado.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

3.1 Planeamento do trabalho

Para atingir os objetivos propostos, utilizou-se como instrumento de análise ambiental uma ACV aplicada aos processos de reciclagem criogénica e recauchutagem dos pneus usados, com recurso ao *software* Umberto. No entanto, dada a impossibilidade de analisar de uma forma extensiva estes dois processos, optou-se por realizar uma ACV simplificada (ACV-s), pelo que, alguns processos e fases do ciclo de vida não foram considerados. Esta simplificação da ACV abrange os mesmos aspectos que uma ACV extensiva, no entanto utiliza dados genéricos ou módulos padronizados para o transporte, para o tratamento de resíduos e para a produção de energia (Jiménez-González, 2011). Esta abordagem limita o âmbito do estudo de diversas formas. Isto é, envolve uma análise limitada das fases do ciclo de vida, tais como impactes operacionais, dos parâmetros ambientais, por exemplo energia ou água, das categorias de impacto, tais como o aquecimento global e depleção de recursos, dos processos, como por exemplo no transporte ou na produção de determinados materiais (Crawford, 2011). Contudo, a abordagem simplificada é útil para fornecer informação base sobre os aspectos mais relevantes. Por exemplo, e tal como refere Crawford (2011) uma SLCA pode esclarecer qual o consumo que tem maior importância durante determinada fase do ciclo de vida, se o consumo de água ou o consumo de energia, por exemplo.

Embora existam outros *software* de modelação para ACV, como o SimaPro e o GABI, recorreu-se ao Umberto por dois motivos principais. Por um lado, porque esta ferramenta existe no Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente e estava disponível para utilização, por outro lado, porque é o que melhor serve os objectivos propostos para este trabalho.

Embora o SimaPro seja mais recorrente para realizar ACV, este é essencialmente aplicado para modelações mais complexas do que a realizada nesta dissertação, que era uma ACV simplificada e, por isso, o Umberto era o mais indicado. O Umberto é uma ferramenta versátil que pode ser utilizada, além de ACV, para Análise de Fluxo de Massa e Energia, para planeamento e optimização de sistemas de processo ou avaliações de custo, bem como outros estudos ambientais. Assim, apresenta como principais vantagens, relativamente a outros *software*, a flexibilidade oferecida para trabalhar com os processos e as etapas, ou seja, estes podem ser facilmente modificados ao longo do estudo, de acordo com as necessidades do utilizador, assim como podem não ser consideradas determinadas fases do ciclo de vida do produto ou processo. Contudo, e embora o Umberto tenha uma biblioteca própria com algumas base de dados, esta é algo incompleta sendo por isso necessário que o utilizador crie alguns módulos.

Em termos metodológicos, e após uma primeira fase dedicada a leituras exploratórias para um melhor conhecimento sobre o resíduo em estudo - o pneu usado, designadamente a composição, o processo de produção, a legislação e os sistemas de gestão existentes para os pneus usados, efectuou-se uma pesquisa mais aprofundada sobre os processos de valorização, em especial a reciclagem criogénica e a recauchutagem.

Seguiu-se uma fase de recolha de informação e dados relativos às entradas e saídas de ambos os processos, necessários à ACV-s. Procurou-se recolher dados de empresas nacionais de reciclagem e recauchutagem, tendo-se para o efeito contactado a Sr^a Climénia Silva, Directora da VALORPNEU, o Eng^o Vasco Pampulim, Director da única empresa que em Portugal faz a reciclagem de pneus usados pelo processo criogénico – a Recipneu e várias empresas nacionais de recauchutagem. Paralelamente enviaram-se, via *e-mail*, pedidos de informação para outras empresas e organizações internacionais.

Enquanto se aguardava pelas informações e dados solicitados, avançou-se para a etapa seguinte que consistiu num treino e aprendizagem da utilização do *software* que ia ser utilizado, o UMBERTO. Foram resolvidos alguns casos de estudo e feitas diversas tentativas utilizando-se dados recolhidos na bibliografia consultada.

Paralelamente, e durante cerca de 2 meses, foram feitas solicitações frequentes, quer por *e-mail* quer por telefone, junto da Recipneu, de modo a conseguir os *inputs* e *outputs* e os respectivos valores considerados pela recicladora. Por fim, o Eng^o Vasco Pampulim reconheceu que, ao contrário do que inicialmente tinha prometido, não iria conseguir fornecer a informação pretendida, disponibilizando-se contudo para uma reunião e visita às instalações da Recipneu, em Sines, por forma a esclarecer um pouco melhor o processo da reciclagem criogénica e comentar alguns dados.

Deste modo, no dia 7 de Julho de 2012, realizou-se uma reunião na Recipneu, seguida de uma visita técnica, tendo-se nesta reunião obtido esclarecimentos sobre o processo criogénico. Esta reunião foi igualmente importante porque, na ausência de dados nacionais, o Eng^o Vasco Pampulim ~~nos~~ garantiu que o processo da Recipneu era muito semelhante ao descrito no trabalho de Corti e Lombardi (2004), assim como os valores que estes autores apresentam neste artigo. Dada esta garantia, para a reciclagem criogénica foram aplicados os dados indicados em Corti e Lombardi (2004).

No que diz respeito aos dados da recauchutagem, e apesar de todos os esforços feitos, não se conseguiram respostas das recauchutadoras nacionais em tempo útil. Como era necessário avançar com o caso de estudo, decidiu-se recorrer então a dados bibliográficos sobre a recauchutagem. Esta recolha de informação foi complexa, pois os dados necessários encontravam-se muito dispersos pela bibliografia disponível. A maior dificuldade encontrada foi em conseguir dados referentes à produção de alguns *inputs* e emissões de *outputs*, nomeadamente a produção e emissões de borracha sintética e de negro de carbono.

Após o desenvolvimento dos sistemas dos processos de reciclagem criogénica e recauchutagem no Umberto, foi selecionado o método de análise de impacte, assim como as categorias e indicadores de impacte a estudar. Desta forma, optou-se pelo método CML 2000, uma vez que apresenta uma abordagem orientada para o problema, ou seja, corresponde ao ponto intermédio no mecanismo ambiental. Este método é recomendado para estudos simplificados, como é o caso da ACV realizada neste estudo, razão pela qual foi utilizado.

Quanto às categorias de impacto foram estudadas apenas a depleção de recursos abióticos e o aquecimento global, embora o CML 2000 apresente outras. Foram apenas selecionadas estas duas categorias por serem as que melhor caracterizam os processos de valorização em estudo. Ou seja, a categoria de impacto da depleção de recursos está relacionada com as entradas (*input*) do processo, e uma vez que se trata de técnicas que consomem recursos necessários à produção de energia que é consumida nesses processos, fontes de energia que, na sua maioria, são combustíveis fósseis. Por sua vez, a categoria da poluição, que abrange por exemplo a depleção do ozono, a acidificação, a eutrofização e o aquecimento global, está relacionada com as saídas (*output*) do processo. Desta forma, como as principais saídas da reciclagem criogénica e da recauchutagem são emissões, optou-se por analisar o impacto associado ao aquecimento global, e não, por exemplo, à eutrofização dado que não existem descargas para água. Hoje em dia o aquecimento global é um impacto que preocupa a maior parte das organizações, daí ter sido também estudado. Posteriormente à aplicação do método de avaliação CML 2000 no Umberto, obtiveram-se resultados que foram sujeitos a uma análise de sensibilidade. Foi calculada uma diminuição e um aumento de 10%, 20% e 30% para os subprocessos da reciclagem criogénica e da recauchutagem com maior contribuição nas categorias de impacto. Esta análise pretendia testar a robustez dos resultados e comparar os resultados obtidos com as respectivas alterações provocadas.

3.2 Metodologia de Análise do Ciclo de Vida

3.2.1 Enquadramento

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) de um produto consiste na investigação dos impactos ambientais em todas as fases do seu ciclo de vida, incluído a extração das matérias-primas até ao seu destino final, passando pelo transporte e utilização. Este instrumento de gestão concede às empresas e indústrias uma noção de quais as incidências ambientais que os materiais, processos e produtos têm ao longo do ciclo. Assim, a metodologia de ACV possibilita que as empresas procurem melhorar e desenvolver cada vez mais os seus produtos de forma sustentável (Azevedo, 2009).

Vinte anos antes de surgir o termo ACV, nos EUA em 1970, praticava-se uma metodologia semelhante a esta, cuja denominação era *Resource and Environmental Profile Analysis* – REPA. Em 1969, a *Midwest Research Institute* (MRI) efectuou um estudo aplicando a metodologia REPA para a Companhia *Coca-Cola*®, onde eram quantificadas as necessidades de recursos, emissões e resíduos provenientes das diversas embalagens de bebidas usadas pela Companhia *Coca-Cola*® (Ferreira, 2004). Antes deste estudo, existia a ideia de que os plásticos tinham um impacto ambiental inconveniente. Porém, e embora os resultados finais do estudo nunca tenham sido publicados, um dos resultados do trabalho foi precisamente evidenciar que as garrafas de plástico tinham menores impactos ambientais do que as de vidro (Ferreira, 2004).

A *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA) encomendou ao mesmo instituto (MRI), em 1972, um estudo sobre as embalagens de cerveja e sumos, o qual assinalou o início do desenvolvimento da ACV tal como é aplicada nos dias de hoje (Ferreira, 2004). Este estudo tinha como objectivo definido pela USEPA, tal como no estudo feito pela *Coca-Cola*®, examinar quais as implicações ambientais da utilização de embalagens de vidro reutilizáveis em alternativa às latas e às garrafas não reutilizáveis, pois na altura as garrafas reutilizáveis estavam a ser substituídas por embalagens não-reutilizáveis (Ferreira, 2004). Depois deste, outros estudos decorreram nos EUA e Europa servindo como base para atingir a metodologia ACV actual (Ciambrone, 1997, *vide* Matos, 2012).

A sociedade tem-se tornado cada vez mais exigente e preocupada com a depleção de recursos criada pelo crescente aumento da procura de bens, serviços e alimentos, o que contribui, igualmente para uma maior degradação ambiental. Tal preocupação levou a que indústrias e empresas procurassem perceber de que forma as suas actividades afectam o ambiente e como poderiam tornar os seus produtos mais sustentáveis (Curran, 2006). A sustentabilidade ao nível do desenvolvimento pressupõe que os sistemas naturais, como a água, os solos, a atmosfera e mesmo os seres vivos, não sejam colocados em risco por um excessivo consumo dos recursos ecológicos que estão ao dispor do ser humano (ONU, 2012). Este conceito teve maior relevância aos 1987, altura em que é publicado um relatório, que ficou conhecido como o Relatório de Brundtland – “Nosso Futuro Comum”, trabalho esse desenvolvido pela WCED - *World Commission on Environment and Development*, onde é definido o conceito de desenvolvimento sustentável como sendo o “desenvolvimento que satisfaz as necessidades actuais sem comprometer a possibilidade das futuras gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (ONU, 2012).

O desenvolvimento sustentável pressupõe assim, o envolvimento de três dimensões importantes, a ambiental, a económica e a social, por forma a atingir um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável, como mostra a Figura 3.1. Através desta interacção é desejável que a sociedade reflecta sobre as estratégias de desenvolvimento, normas de justiça social e preservação do ambiente, resultante de uma modificação de padrão de pensamento.

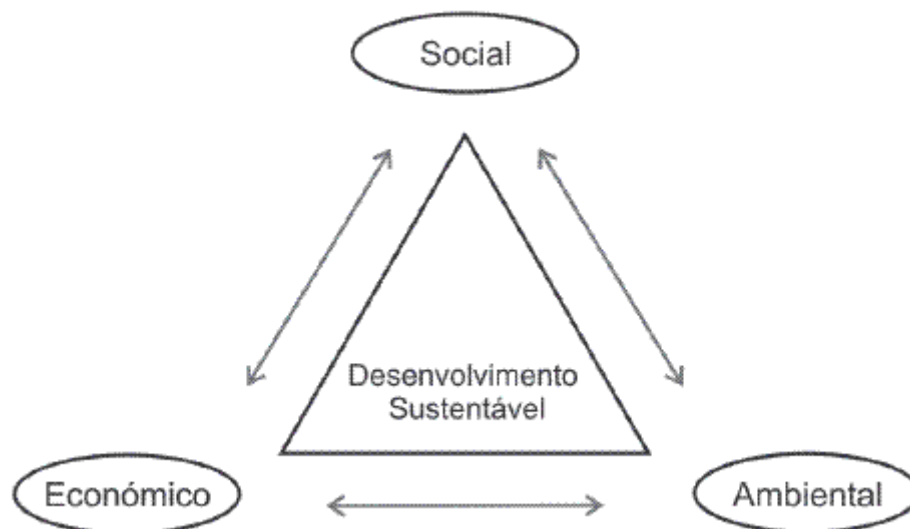


Figura 3.1 - Pilares do Desenvolvimento Sustentável (Pereira, 2009)

O suporte que este conceito oferece no processo de tomada de decisão e respectiva orientação, passa pelo incentivo ao desenvolvimento de tecnologias que deverão, sobretudo, garantir um crescimento económico e, ao mesmo tempo, que os impactes ambientais das indústrias sejam mínimos. Desta forma, pretende-se assegurar que toda a comunidade tenha um padrão de qualidade de vida considerável.

Assim, em 1992, foi fundada a Sociedade para a Promoção do Desenvolvimento do Ciclo de Vida (SPOLD), cuja função era reunir recursos que permitissem acelerar o desenvolvimento da metodologia ACV como ferramenta de gestão aceite, de modo a auxiliar nos processos de tomada de decisão (Ferreira, 2004).

No final dos anos noventa, começou a sentir-se necessidade de uniformizar os métodos de ACV uma vez que começava a ser um instrumento bastante utilizado. É nesta altura, no período de 1997 a 2002, que a *International Organization for Standardization* (ISO) cria a série de normas 14040. No subcapítulo 3.2.3 são referidas quais as primeiras normas em vigor e a respectiva actualização.

3.2.2 Definição e aplicabilidade da ACV

A ACV é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos potenciais impactes ambientais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. O termo “ciclo de vida” refere-se à maioria das actividades no decurso da vida do produto incluindo a aquisição de matéria-prima necessária para a fabricação do produto, a sua fabricação, utilização, manutenção e deposição final (USEPA, 2001).

Num estudo de ACV, de um produto ou serviço, todas as extrações de recursos e emissões para o ambiente são determinadas, quando possível, numa forma quantitativa ao longo de todo o ciclo de vida, desde que o produto "nasce" até que "morre" - “*cradle to grave*”, sendo com base nestes dados que são avaliados os potenciais impactes nos recursos naturais, no ambiente e na saúde humana, e que se procuram oportunidades para os amenizar (Curran, 2006; Van den Heede, 20012).

A metodologia ACV inclui todos os impactes verificados ao longo do ciclo de vida do produto, o que permite obter uma visão abrangente dos aspectos ambientais que estão associados ao produto ou ao processo (Curran, 2006). A Figura 3.2 ilustra as possíveis fases do ciclo de vida de um produto ponderadas numa ACV e os *inputs* e *outputs* que são normalmente considerados.

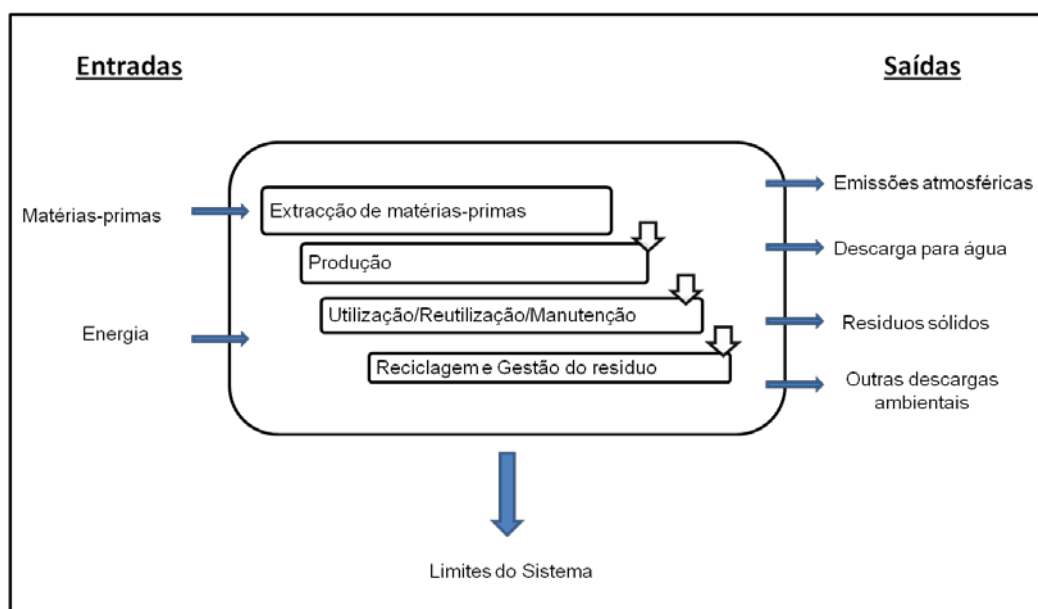


Figura 3.2 - Estágios do ciclo de vida do produto (Curran, 2006)

De uma forma geral e fazendo uma descrição do esquema, a avaliação integrada de ACV passa, antes de mais, pela extração ou obtenção da matéria-prima, consoante a sua origem, o que

exige consumo de energia gerando consequentemente resíduos (Curran, 2006). Para que as matérias-primas cheguem ao local onde vão ser processadas é essencial que sejam transportadas, quer seja por meios aéreos, marítimos ou terrestres, o que implica necessariamente mais consumo de energia e emissões para a atmosfera, água e/ou solo. Em cada fase do processo produtivo continuará a existir necessidade de utilizar materiais e consumir mais energia e, consequentemente, são gerados mais resíduos. Após o processo produtivo, o produto pode vir a requerer mais consumo de energia e recursos durante a fase de uso. No final do período de vida útil o produto pode ter vários destinos de valorização, como ser reutilizado, reciclado ou, dependendo da sua natureza, ser incinerado ou depositado em aterro (Birkeland, 2002).

Todo o ciclo de vida de um produto, desde a extracção e/ou aquisição da matéria-prima, passando pela produção de materiais e energia, processo de fabricação, utilização do produto, tratamento em fim de vida e sua eliminação, é considerado numa ACV. Nesta metodologia poderão ser identificados e possivelmente evitados os potenciais de carga ambiental entre as fases do ciclo de vida de um produto (ISO, 2006a). A ACV engloba os aspectos ambientais e os impactos do produto, ficando fora do âmbito de uma ACV. Porém podem ser combinadas outras ferramentas com a ACV para estudos mais aprofundados (ISO, 2006a).

Esta metodologia de análise está estruturada em torno de uma unidade funcional (ISO, 2006a). Esta unidade funcional é a base da análise definindo o que está a ser estudado e onde é predefinida uma quantidade de produto (ISO, 2006a; Tan, 2005). Uma vez que esta metodologia é aplicada, essencialmente, de uma forma comparativa, a unidade funcional na ACV, fornece uma base de comparação do desempenho ambiental das diferentes alternativas em estudo (Tan, 2005). Assim, todas as análises subsequentes são em função a essa unidade funcional, tal como todas as entradas e saídas do inventário (ISO, 2006a; Tan, 2005). Outra característica da ACV passa pela avaliação de todos os impactos no sistema em estudo, quer sejam eles indirectos ou directos. Por fim, a ACV permite quantificar diferentes formas de impacto ambiental, por exemplo, o aquecimento global, formação de chuvas ácidas, depleção de recursos, apresentando uma perspectiva de multicritério (Tan, 2005). Cada fase da ACV utiliza resultados obtidos noutras fases contribuindo para uma maior compreensão e consistência do estudo e dos resultados (ISO, 2006a).

A ACV é uma técnica de avaliação dos aspectos ambientais e potenciais impactos associados a determinado bem, serviço ou processo. Esta avaliação é feita através da compilação de um inventário onde constem todas as entradas de energia e materiais relevantes, bem como as respectivas saídas. A avaliação é igualmente feita através da avaliação dos potenciais impactos associados das entradas e saídas identificadas e da interpretação dos resultados, de modo a ajudar que os processos de tomada de decisão sejam feitos de forma mais consciente e informada (Curran, 2006).

Em suma, e segundo a norma ISO 14040:2006 (ISO, 2006a), a ACV é uma ferramenta que auxilia a identificação de oportunidades de melhorar o desempenho ambiental dos produtos em diversas fases do seu ciclo de vida, fornece informação nos processos de tomada de decisão na

indústria, bem como nas organizações governamentais ou não-governamentais, por exemplo realização de planeamentos estratégicos ou nas definições de prioridades. Pode ainda auxiliar a selecção de indicadores de desempenho ambiental ou nas estratégias de *marketing* como por exemplo, implementando sistemas de rotulagem ecológica, ou através de declarações ambientais (ISO, 2006a).

3.2.3 Regulamentação Normativa

Com o objectivo de uniformizar as metodologias inerentes à regulamentação normativa e a outras ferramentas estruturadas de gestão ambiental, a ISO publicou as quatro normas referentes a ACV, descritas na Tabela 3.1 (Ferreira, 2004):

Tabela 3.1 – Listagem das normas internacionais pelas quais a ACV se orientava

Designação	Descrição
ISO 14040:1997, Environmental management – LCA – Principles and framework	<i>Principles and framework</i> , relativa avaliação ciclo de vida
ISO 14041:1998, Environmental management – LCA – Goal and scope definition and inventory analyses	<i>Goal and scope definition and inventory analyses</i> , relativa à definição de objectivos, âmbito e análise de inventário
ISO 14042: 2000, Environmental management – LCA – Life Cycle Assessment	<i>Life cycle impact assessment</i> , relativa à avaliação de impactes associados ao ciclo de vida
ISO 14043:2000, Environmental management – LCA – Life Cycle Interpretation	<i>Life cycle interpretation</i> , relativa à interpretação dos resultados do inventário e da avaliação de impactes associados ao ciclo de vida

Desde então, a metodologia ACV tem estado sujeita a várias revisões e melhorias, o que culminou na alteração das normas anteriores. Em 2006 foram publicadas as normas com as respectivas alterações (Tabela 3.2), sendo estas as que actualmente estão em vigor.

Tabela 3.2 – Listagem das Normas Internacionais actualmente em vigor que complementam as anteriores

Designação	Descrição
ISO 14040:2006, Environmental management – LCA – Principles and framework (substitui a norma ISO 14040:1997)	<i>Principles and framework</i> , relativa à avaliação do ciclo de vida
ISO 14044:2006, Environmental management – LCA – Requirements and guidelines	<i>Requirements and guidelines</i> , relativa à avaliação do ciclo de vida

Ao contrário do que acontece na maioria dos países da UE, em Portugal não existe nenhuma entidade, nem pública nem privada, responsável por desenvolver aspectos relacionados com a metodologia ACV (Ferreira, 2004).

3.2.4 Etapas de ACV

De acordo com a norma ISO 14040, o processo de ACV é uma abordagem sistemática faseada composta por quatro componentes descritos de seguida. A Figura 3.3 ilustra o esquema das diferentes etapas pelas quais a ACV se rege.

1. Definição do objectivo e âmbito

É nesta fase em que se definem os objectivos que deverão ser alcançados, incluindo os métodos utilizados, pressupostos e limitações do estudo. Assim, no âmbito da ACV deverá estar incluído o sistema do produto a ser estudado, a definição da unidade funcional e dos limites do sistema, bem como os pressupostos assumidos, as limitações (ISO, 2006b). Nesta etapa deve-se também identificar os dados necessários, a metodologia e os requisitos de avaliação de impactes (Matos, 2012). Em alguns casos, existe a necessidade do objectivo e do âmbito do estudo serem revistos e modificados devido a limitações imprevistas, restrições ou informação adicional. Todas as modificações realizadas deverão ser devidamente justificadas e documentadas (ISO, 2006b).

2. Análise de inventário (ICV)

Nesta etapa é feito o inventário e quantificados todos os *inputs* e *outputs*, que corresponde às entradas e saídas, respectivamente, relativos ao ciclo de vida do produto. As entradas são normalmente os recursos utilizado, como energia, transportes, materiais, e as saídas podem ser, além de emissões (gasosas, líquidas ou sólidas), materiais. A etapa de ICV é dinâmica pois à medida que se recolhem novos dados e mais é aprendido sobre o sistema, surgem novas exigências e limitações que poderão obrigar a uma mudança no processo de recolha de dados de modo a cumprir os objectivos do estudo (ISO, 2006a).

3. Avaliação de impacte (AICV)

O objectivo desta etapa é compreender e avaliar a magnitude e significância dos potenciais impactes para o ambiente e para a saúde humana utilizando resultados de ICV. Assim, este processo associa dados recolhidos no inventário com as categorias de impacte ambiental e indicadores de categoria. Da AICV resulta informação para a fase da interpretação dos resultados (ISO, 2006a).

4. Interpretação dos resultados (IRCV)

A fase da interpretação é a fase na qual as conclusões da ICV e AICV são consideradas em conjunto. Nesta etapa deve-se apresentar os resultados consistentes com o objectivo e âmbito definidos para o estudo (ISO, 2006a).

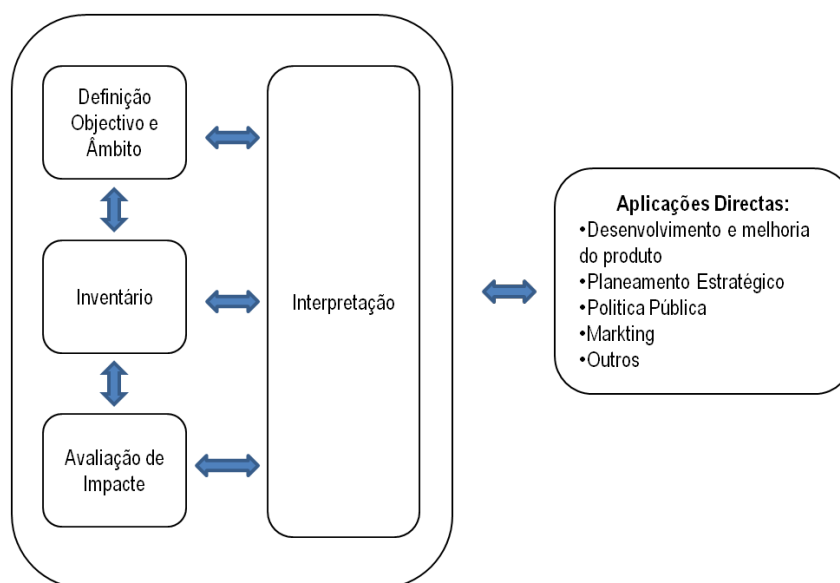


Figura 3.3 - Fases da Análise do Ciclo de Vida (ISO, 2006a)

3.2.4.1 Definição do objectivo e âmbito

Na Norma ISO14040 (ISO, 2006a) pode ler-se que “ (...) o objectivo de um estudo de ACV deve expor de forma não ambígua a aplicação planeada, as razões para levar a cabo o estudo e audiência pretendida, isto é, a quem irão ser comunicados os resultados do estudo”. Esta etapa deve ser realizada de modo a que a sua extensão, detalhe e profundidade do estudo possibilitem alcançar os objectivos definidos.

Por isso, deveram ser considerados e descritos claramente os seguintes aspectos:

- ✓ O sistema do produto em estudo;
- ✓ As funções desse sistema ou sistemas, caso seja um estudo comparativo;
- ✓ A unidade funcional;
- ✓ Os limites do sistema do produto;
- ✓ As categorias de impacte e metodologias de análise de impacte e subsequente interpretação a utilizada;
- ✓ Os requisitos dos dados;
- ✓ Os pressupostos;
- ✓ As limitações;
- ✓ Os requisitos iniciais de qualidade dos dados;
- ✓ O tipo de revisão crítica;
- ✓ O tipo e formato de relatório requerido para o estudo.

Função do sistema e unidade funcional

De acordo com a norma ISO 14040:2006 (ISO, 2006a), as funções do sistema a ser estudado estão dependentes do objectivo e âmbito definidos na ACV, e deverão estar devidamente identificadas. A função está directamente relacionada com as questões a que o estudo procura responder e a unidade funcional definida será a base do estudo (Todd e Curran, 1999). O principal propósito da unidade funcional é dar referência sobre as entradas e saídas do sistema. A escolha da unidade funcional deve considerar a função do objecto de estudo, isto é, do ponto de vista do utilizador, considerando a eficácia e durabilidade do produto. Uma unidade funcional bem definida permite também que as comparações entre sistemas alternativos sejam mais significativas. Deste modo, deverão ser incluídos todos os factores envolvidos na decisão, acção ou actividade que será afectada pelo estudo (Todd e Curran, 1999).

Limites do sistema

Os limites do sistema numa ACV definem os processos unitários e actividades que devem estar incluídos no sistema em estudo (Todd e Curran, 1999). A norma ISO 14040 refere que o critério para a definição dos limites deve estar identificado e justificado no âmbito do estudo. Idealmente, todos os fluxos de matéria e de energia deviam ser quantificados, numa ACV, desde a sua origem até à sua devolução à Terra.

Deste modo, há que decidir quais os processos unitários a serem modelados no estudo, quais as emissões para o ambiente que serão contabilizadas, quais os consumos energéticos que serão avaliados e em que detalhe (Ferrão, 1998). Tal como refere este autor, o critério subjacente à definição das fronteiras do sistema deverá depender principalmente da possibilidade de obtenção de informação suficiente, para que os resultados do estudo não sejam comprometidos.

No início de uma ACV, todas as fases do ciclo de vida devem ser consideradas, e caso haja alguma omissão de uma ou mais fases, esta deverá ser referida e justificada (Ferrão, 1998). Após uma análise cuidadosa, pode existir a necessidade de eliminar a recolha de dados a partir de algumas destas fases ou subprocessos (Todd e Curran, 1999).

Qualidade dos dados

A norma ISO 14040 estabelece que os requisitos da qualidade dos dados especificam, em termos gerais, as características dos dados usados no estudo. A qualidade dos dados deve indicar qual a cobertura temporal, geográfica e tecnológica considerada, precisão, representatividade dos dados, consistência e reprodutibilidade dos métodos utilizados ao longo da ACV, a fonte dos dados e sua representatividade e incerteza (ISO 2006b).

3.2.4.2 Inventário

Nesta fase são identificadas e quantificadas as entradas e saídas do sistema do produto investigado (Ferreira, 2004), como energia e matéria-prima requeridas, emissões atmosféricas, resíduos e descargas líquidas (Ferrão, 1998). À medida que os dados vão sendo recolhidos, e que surge mais informação sobre o sistema, novos requisitos de dados e limitações podem ser identificados, sendo necessário existir uma alteração nos procedimentos de recolha de dados para que os objectivos do estudo sejam alcançados (Ferrão, 1998).

A análise de inventário processa-se através das seguintes fases: construção da árvore de processo, definição dos limites do processo, recolha de dados, procedimentos de cálculo, análise de resultados (Ferrão, 1998; Ferreira, 2004).

Árvore de processo

A melhor forma de representar as componentes de um sistema é através de um diagrama de blocos. Este diagrama permite evidenciar os processos unitários do sistema e a relação entre eles de forma compreensível, numa vista global do processo. O sistema considerado e a disponibilidade dos dados vão definir a complexidade do diagrama de blocos, sendo que ao longo do estudo poderá existir a necessidade de subdividir um determinado processo e agrupar outros por falta de informação detalhada para a sua caracterização (Ferrão, 1998).

Recolha de dados

Conforme a norma ISO 14040 (ISO, 2006a), para análise do inventário, os dados qualitativos e quantitativos deverão ser recolhidos para cada processo unitário que se encontre dentro dos limites do sistema. O sistema internacional de unidades, SI, deve exprimir todas as emissões e extracções. Os dados devem ser obtidos, preferencialmente, através de empresas que operam os processos

específicos em estudo. Na eventualidade de estes não estarem disponíveis, pode-se recorrer a dados de outras fontes, como dados de projecto dos processos, cálculos de engenharia baseados na química e tecnologia dos processos, estimativas de operações similares e bases de dados publicadas (Ferreira, 2004). Os dados considerados devem ser baseados num período de tempo suficientemente longo de modo a colmatar comportamentos anormais (paragens de máquinas ou perturbações no processo).

É importante que as bases de todos os dados sejam devidamente documentadas, bem como a sua fonte, relevância geográfica e temporal, quais as técnicas utilizadas para ponderação e determinação de valores médios. Assim, mais uma vez a qualidade dos dados deve estar de acordo com os objectivos e âmbito do estudo em causa (Ferreira, 2004). O balanço mássico e energético deve ser completo, ou seja, o somatório das massas e energético de entrada deve ser igual ao somatório das massas e energético de saída (Ferrão, 1998).

Procedimentos de cálculo

O processamento de dados implica a sua transformação, para permitir o cálculo das contribuições dos diferentes impactes gerados ao longo do ciclo de vida. Esta transformação é geralmente executada com o apoio de programas informáticos, desenvolvidos particularmente para ACV (Ferrão, 1998). A quantidade de cada componente/substância é agrupada e construída a tabela de inventário.

Análise dos resultados

A consistência dos resultados obtidos pode ser avaliada com recurso a indicadores de confiança, de integrabilidade, de correlação temporal, geográfica e tecnológica (Ferrão, 1998).

3.2.4.3 Avaliação de impacte

De acordo com Ferreira (2004), a Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (AICV) é definida como sendo um processo técnico, quantitativo e/ou qualitativo que permite caracterizar e avaliar os efeitos das cargas ambientais que foram identificadas na fase do inventário. Considera-se como impactes as consequências causadas pelos fluxos de entrada e de saída de um sistema na saúde humana, fauna e flora, ou ainda na disponibilidade de recursos naturais. Esta fase de avaliação de impacte serve essencialmente para tornar os dados do inventário mais relevantes, pois proporciona um maior conhecimento sobre os potenciais impactes ambientais. Para além disso, permite ainda facilitar a agregação e interpretação dos dados de inventário de modo que sejam mais facilmente trabalhados e mais significativos para os processos de tomada de decisão. Na fase de AICV existem elementos obrigatórios e de elementos opcionais, como mostra a Tabela 3.3. Os elementos obrigatórios vão estabelecer o perfil ambiental AICV, sendo posteriormente sujeito aos elementos opcionais.

Tabela 3.3 – Elementos obrigatórios e opcionais da fase de AICV (adaptado de ISO, 2006a)

Elementos Obrigatórios	Seleção de categorias de impacte, indicadores de categoria e modelos de caracterização
	Classificação (atribuição dos resultados do ICV)
	Caracterização (cálculo dos resultados do indicador de categoria)
Elementos Opcionais	Normalização
	Agregação
	Ponderação
	Análise de qualidade dos dados

Os resultados do ICV são convertidos, através dos elementos obrigatórios, em resultados de indicador de categoria (perfil ambiental) para as diversas categorias de impacte. Os elementos opcionais normalizam, agrupam e pesam os resultados do indicador e técnicas de análise de qualidade de dados (Ferreira, 2004).

Elementos obrigatórios

Seleção das categorias de impacte e classificação

A selecção de categorias de impacte deve ser realizada durante a fase inicial aquando da definição de objectivos e âmbito, de modo a orientar o processo de recolha de dados de ICV (Ferreira, 2004). Esta selecção consiste na determinação das categorias de impacte, de indicadores de categoria e modelos de caracterização a adoptar (Sousa, 2008).

A classificação permite que seja estabelecida uma correspondência de cada elemento recolhido na tabela de inventário, com a devida categoria de impacte. Assim, são atribuídos pesos que ponderam a contribuição das diferentes intervenções ambientais de cada categoria de impacte (Pereira, 2005). No entanto, é necessário ter atenção para que não sejam feitas duplas contagens das cargas ambientais (Sousa, 2008). Embora as normas ISO não estabeleçam quais as categorias de impacte a ser utilizadas, as mais vulgares encontram-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Lista de categorias de impacto para ICV (adaptado de Ferreira, 2004)

Depleção de Recursos	Poluição	Degradação de Ecossistemas e Paisagem
Recursos abióticos	Aquecimento global	Utilização do solo
	Depleção do ozono	
	Formação de oxidantes fotoquímicos	
Recursos bióticos	Acidificação	
	Eutrofização	
	Toxicidade humana	
	Ecotoxicidade	

Caracterização

A caracterização agrega as cargas ambientais dentro de cada categoria de impacto e a sua conversão para unidades SI (indicadores de categoria), recorrendo a factores de caracterização (ou equivalência), que exprimem a contribuição relativa da substância (Sousa, 2008). Dando um exemplo prático, o factor de caracterização do CO₂ na categoria de alteração climática é igual a 1, e do metano (CH₄) pode ser de 21 kg. Isto significa que a libertação de 1 kg de metano corresponde a uma libertação igual a 21kg de CO₂. O resultado total é expresso em indicadores de categoria de impacto, neste caso é em kg de CO₂.

Elementos opcionais

Normalização

Segundo Ferreira (2004), a normalização dos resultados do indicador auxilia na compreensão da magnitude relativa de cada resultado do indicador do sistema do produto em estudo. Através da normalização é calculada a magnitude relativa a uma informação de referência e é útil, por exemplo, para verificar inconsistências. Com a normalização dos resultados do indicador a saída dos elementos obrigatórios da fase AICV é alterada, é aconselhável recorrer a mais do que um sistema de referência (análise de sensibilidade), de modo a visualizar as consequências na saída dos elementos obrigatórios na fase AICV (Ferreira, 2004).

Ponderação

Os valores correspondentes às várias categorias podem ser opcionalmente agrupadas em subconjuntos de categorias (Pereira, 2005). Assim são atribuídos pesos ou valores relativos às diferentes categorias de impacto baseado na sua importância no estudo (Ferreira, 2004).

3.2.4.4 Interpretação

Esta é a última fase do processo de ACV, segundo a norma ISO 14043:2000, e consiste numa retrospectiva e análise crítica do ciclo de vida, de modo a poder-se tirar conclusões e recomendações de suporte à tomada de decisão de forma transparente, sempre de acordo com o que foi estabelecido nos objectivos e âmbitos do estudo (Pereira, 2005). A interpretação tem como principais elementos a identificação dos problemas mais relevantes (baseado no ICV e AICV), a avaliação (consistência e análise de sensibilidade), a conclusão, a recomendação e a divulgação (Ferreira, 2004).

A interpretação dos resultados de um estudo de ACV é um procedimento complexo, onde todas as decisões que foram tomadas nas fases de inventário e avaliação de impacto devem ser igualmente abrangidas nos resultados finais, de forma a tornar as conclusões retiradas do estudo claras e compreensíveis. É possível que no fim não se consiga definir nenhuma alternativa melhor que outra, devido sobretudo à incerteza dos resultados. No entanto, a ACV fornece informação detalhada e ajuda a perceber os impactes associados a cada alternativa.

3.2.5 Limitações da ACV

Embora a ACV seja uma ferramenta bastante útil, esta apresenta algumas limitações. Uma ACV completa pode ser muito intensiva, quer por questões temporais, quer pelos recursos, especialmente se não existirem dados disponíveis (Jiménez-González, 2011). Na maioria das ACV os dados necessários são se encontram disponíveis, ou, se por ventura estiverem, estes deverão ter uma incerteza associada maior à que o utilizador está disposto a aceitar. Em praticamente todas as ACV é, inevitavelmente, necessário assumir pressupostos referentes aos dados, ou mesmo recorrer a dados médios de diversas fontes (Jiménez-González, 2011). Deve sempre ser tido em conta que a disponibilidade de dados e a sua qualidade pode afetar os resultados finais e que a execução de uma ACV extensiva e completa é extraordinariamente onerosa em termos de tempo e custos (Ferreira, 2004).

Juntamente com as limitações dos dados reais e num contexto sustentável mais amplo, existe a necessidade de a ACV continuar a evoluir com o estado da arte e da ciência. Apesar de ser a metodologia de sustentabilidade mais holística até ao momento, os aspectos sociais e económicos têm sido postos de parte no âmbito da tradicional ACV, embora existam outras ferramentas que colmatam esta lacuna, como por exemplo a análise de custos (Jiménez-González, 2011). Por isso, a informação resultante de um estudo ACV deve ser componente integrante de um processo de tomada de decisão, juntamente com outras ferramentas de avaliação de custo e de desempenho (Ferreira, 2004).

3.2.6 Simplificação de ACV – Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA)

Uma ACV completa necessita de um investimento financeiro elevado e de muito tempo dispendido, além disso, na maioria das vezes, a disponibilidade dos dados reais é escassa (Todd and Curran, 1999). Uma forma de solucionar esta problemática é recorrendo ao método simplificado, ou seja Análise do Ciclo de Vida Simplificado (ACV-s), sendo designada na literatura inglesa por “SLCA – Streamlined Life Cycle Analysis”.

De acordo com a SETAC, a simplificação de ACV aplica a mesma metodologia que uma ACV completa abrangendo os mesmos aspectos. Assim, no lugar de usar dados específicos de locais, de tempo, de métodos e de tecnológicos no decorrer da avaliação uma SLCA tende a utilizar dados genéricos em segundo plano ou módulos padrão para o transporte, tratamento de resíduos e produção de energia conduzindo uma avaliação simplificada que realça as fases ou impactes mais relevantes (Jiménez-González, 2011). A questão não se coloca na possibilidade de efetuar uma ACV simplificada, mas sim em averiguar o quanto a simplificação é apropriada e que aproximações levam a resultados mais rigorosos (Todd and Curran, 1999). Será, então necessário que a confiabilidade dos resultados seja avaliada através de análises de incerteza e de sensibilidade (Jiménez-González, 2011).

Em 1994, a SETAC *North America* concebeu um grupo de trabalho especializado em SLCA com o objetivo de estudar as metodologias utilizadas e tentar padronizar o processo. No relatório “*Streamlined Life-Cycle Assessment: A final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup*” estão referidas algumas aproximações (Todd and Curran, 1999).

A metodologia de SLCA pode ser utilizada por limitações dos objetivos do estudo ou simplificação dos procedimentos de modelação, limitando as quantidades de dados e informação necessária. Como consequência destas limitações impostas, haverá uma simplificação do inventário de ciclo de vida, quer por eliminação de fase do ciclo de vida, quer por redução dos dados requeridos nos processos unitários.

Nesta metodologia, quando não existem dados do processo em causa recorre-se a dados de processos semelhantes, e são excluídos os componentes que contribuem com menos que uma determinada percentagem específica do processo ou produto, ou seja, têm um contributo insignificante para o processo. Habitualmente na ACV, esta percentagem ronda os 1%, sendo o uso de uma percentagem mais elevada aceitável num SLCA. Portanto, são limitados os itens estudados e destacados aqueles que terão à partida maior importância para o produto em causa.

A importância da SLCA tem vindo a aumentar ao longo do tempo, sendo que o desenvolvimento e aplicação de métodos simplificados de ACV fidedignos é uma das principais áreas que melhora significativamente os estudos de ACV na pesquisa, no desenvolvimento e no sector da indústria em geral (Jiménez-González, 2011).

Os estudos de SLCA são um recurso bastante utilizado, pois, e tal como as ACV completa, auxilia nos processos de tomada de decisão. Por exemplo, na Austrália foi realizado um estudo onde foram recolhidos resíduos de diversos locais como praias, estacionamento, autoestradas, zonas residenciais, centros comerciais. Os principais resíduos que receberam particular atenção foram os resíduos de polietileno de alta densidade (HDPE) maioritariamente utilizados em sacos de plástico, que embora sejam bastante práticos para transportar as compras da população, são também muitas vezes esquecidos e abandonados na via pública ficando presos nas vedações ou na vegetação e representam risco na vida marinha e aquática apresentando risco de ingestão ou sufocamento. Desta forma surgiu a sugestão de cobrar os sacos de modo a reduzir o seu consumo. Foram também introduzidos no mercado outros sacos de plástico de polímeros degradáveis tendo sido apresentados como uma solução para o consumo de sacos de plástico. Assim, o Departamento Ambiental e do Património da Austrália (*Australian Department of Environmental and Heritage*) autorizou a realização de uma SLCA que comparava sacos de papel, sacos reutilizáveis e sacos produzidos a partir de polímeros degradáveis (Horne *et al.*, 2009).

3.2.7 Informação e dados de base

No caso de estudo desta dissertação não foi possível obter dados reais por parte das empresas de reciclagem e recauchutagem contactadas. Desta forma, foi necessário recorrer a bibliografia para prosseguir o estudo, tal como é sugerido pela metodologia de SLCA. Alguns dos módulos, como a produção de vapor de água, foram recolhidos da base de dados do software do Umberto. A Tabela 3.5 apresenta a bibliografia que foi consultada para aquisição de dados sobre as entradas e saídas dos processos de valorização.

Tabela 3.5 – Bibliografia dos dados utilizados

Processo	Reciclagem criogénica	Materiais	Fonte
		Trituração mecânica	
		Pneus usados	Unidade funcional
		Electricidade	Corti e Lombardi, 2004
		Aço	
		Água	
		Pulverização criogénica	
		<i>Chips</i>	Corti e Lombardi, 2004
		Electricidade	
		Azoto	
		Vapor de água	Base de dados do Umberto
	Recauchutagem	Pneus usados	Unidade funcional
		Electricidade	Pecnik, 2008
		Borracha sintética	ProBas, 2010
		Borracha natural	Pecnik, 2008
		Negro de carbono	USEPA, n.d
		Gás natural	ProBas, 2010
		Óleo lubrificante	Pecnik, 2008
		Outros materiais	

CAPÍTULO 4 PRESSUPOSTOS METODOLÓGICOS E RESULTADOS

4.1 Considerações prévias

Neste capítulo são apresentados os pressupostos e resultados obtidos da ACV realizada ao processo de reciclagem criogénica de pneus usados, bem como da ACV realizada ao processo de recauchutagem de pneus usados, com o objectivo de avaliar o impacte ambiental que cada processo tem no ambiente. A comparação destes dois processos permite compreender melhor qual o processo com menores impactes ambientais.

Neste tipo de análises existe uma limitação algo significativa referente à obtenção de dados, condicionando as conclusões do mesmo. Estas limitações foram encontradas na realização deste estudo, nomeadamente na aquisição de dados para a ACV que não se conseguiu tão completa como o desejado. Desta forma, recorreu-se a algumas das simplificações anteriormente explicitadas. Além da dificuldade de obter dados referentes à produção junto do produtor, a ferramenta informática e a base de dados, utilizada para a realização deste estudo, não dispunham de dados para alguns dos processos e materiais empregues. Nestes casos foram utilizados dados da bibliografia consultada.

Uma vez que estas limitações condicionam a elaboração do estudo de ACV, procurou-se outra forma de complementar as informações relativamente ao produto, tendo sempre em vista o ciclo de vida. De modo a colmatar algumas destas falhas, utilizou-se a *Streamlined Life Cycle Analysis* (SLCA).

4.2 Análise do ciclo de vida - ACV

A aplicação da ferramenta ACV foi concretizada com limitações relacionadas com a dificuldade na obtenção de dados. A análise foi realizada com base nas instruções dadas nas normas ISO 14040.

4.2.1 Definição do objectivo e âmbito

4.2.1.1 Definição do objectivo

O objectivo deste estudo consiste no estudo da viabilidade ambiental de dois processos de valorização de pneus usados, nomeadamente da produção de granulado de borracha através da reciclagem criogénica e a recauchutagem, permitindo a determinação de quais os impactes mais relevantes, a origem dos mesmos, e em que é que o produto pode ser melhorado. As comparações foram realizadas recorrendo a uma ACV simplificada, segundo a norma ISO 14040.

4.2.2 Definição do âmbito

Unidade funcional

Neste estudo, a unidade funcional (u.f.) utilizada foi definida como sendo a massa, em kg, que entra para cada um dos processos, na reciclagem e na recauchutagem, assim sendo, foi considerada a entrada de 1000 kg de pneus usados. Para o processo da reciclagem, o pneu considerado foi um pneu genérico de veículos ligeiros e, no caso da recauchutagem, foram considerados pneus de veículos ligeiros com 17,5 polegadas e a mesma quantidade de entrada de pneus, 1000 kg.

Categorias de impacte e metodologia de avaliação de impacte

Relativamente à metodologia de avaliação de impacte na ACV foi utilizada a *CML 2000*, com recurso ao *software* Umberto como ferramenta de modelação. No que diz respeito às categorias de impacte, no presente estudo foram consideradas a depleção de recursos abióticos e o aquecimento global, uma vez que traduzem problemáticas ambientais mais relevantes para a gestão deste fluxo específico.

O método *CML 2000* é um método *multi-fase* e foi um dos primeiros a ser utilizado como método de avaliação em vários países. A sua designação provém da entidade que o desenvolveu, o Centro de Gestão Ambiental da Universidade de Leiden, na Holanda. Nesta abordagem, para cada problema existem factores de caracterização quantificados. Assim, uma emissão identificada no ICV é convertida numa contribuição para o efeito de um problema ambiental, multiplicando-a por um factor equivalente (Ferreira, 2004). Optou-se por utilizar este método uma vez que permitia obter especificamente o impacte em separado, neste caso, a depleção de recursos abióticos e o aquecimento global.

No que concerne às categorias de impacte escolhidas, o indicador de depleção abiótica está relacionado com a extracção de minerais e de combustíveis fósseis que entram no sistema. O factor de depleção abiótico (ADP – *Abiotic Depletion Potencial*) é definido para cada extracção de minerais e combustíveis fósseis, com base nas suas reservas e taxa de desacumulação (Ferreira, 2004). A depleção de recursos abióticos está, de igual forma, fortemente dependente da forma como é gerada a energia eléctrica e, assim sendo, o consumo de electricidade é um componente importante neste estudo (Pikon, 2012).

Quanto ao indicador de aquecimento global, este resulta da radiação de baixo comprimento de onda do Sol que entra em contacto com a superfície da Terra, sendo que parte da radiação é absorvida e outra parte é reflectida como radiação infra-vermelha. Esta radiação que é reflectida para a atmosfera, é absorvida pelos chamados gases de efeito de estufa (GEE) que a irradiam em todas as direcções, nomeadamente de volta para a Terra. Esta dinâmica culmina no aquecimento global da superfície terrestre (La Bruna, 2011). Adicionalmente a estes mecanismos naturais, o efeito de estufa

é acentuado pelas actividades antropogénicas, que têm uma quota-parte considerável (La Bruna, 2011). Este fenómeno tem consequências adversas no equilíbrio dos ecossistemas, da saúde-pública e bem-estar material (Pereira, 2005). O indicador de aquecimento global recorre ao modelo de caracterização desenvolvido pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Os factores de caracterização são expressos como potencial de aquecimento global – *Global Warming Potencial (GWP)* em kg equivalentes de CO₂ / kg de emissão (Ferreira, 2004).

Definição do sistema do produto

Os processos da reciclagem criogénica de pneus usados com produção de granulado de borracha e da recauchutagem encontram-se representados nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente, que representam a definição do sistema. Nas figuras são evidenciadas as principais entradas e saídas de cada processo. O esquema representativo da reciclagem criogénica (Figura 4.1) é o esquema do processo descrito por Corti e Lombardi (2004) por ausência de dados.

No processo da reciclagem, antes de obter o granulado de borracha, os pneus passam por uma fase mecânica, a moagem, de onde resultam os *chips* de pneus usados, com aproximadamente 7 a 10 cm, e são removidas as componentes metálicas. Como *inputs*, além dos pneus usados, tem-se a electricidade, água e óleo. De seguida, os *chips* são submetidos a condições criogénicas de modo a reduzir o seu tamanho para obter granulado de borracha.

A recauchutagem consiste no aproveitamento da estrutura resistente, através da grosagem (raspagem), do pneu gasto, de modo a preparar o pneu para ser aplicada uma nova borracha de piso. Desta primeira fase, fundamental, resulta o resíduo mais característico da recauchutagem, o pó e aparas de borracha. Após a grosagem do piso do pneu é aplicada a cola, cujo teor de solventes orgânicos é variável, e aplicado o novo piso com extrusora. Ao contrário do processo a frio em que os pneus são vulcanizados num autoclave em grupos, no processo a quente cada pneu é vulcanizado individualmente. Posteriormente, o pneu é colocado numa prensa com o molde do piso pretendido aquecido a vapor, atingindo temperaturas na ordem dos 150 °C – 165 °C. Para que o molde possa ser aquecido existe um grande consumo de electricidade e gás natural para produção do vapor. Na fase seguinte, e depois de o pneu arrefecido, este poderá ir para a fase de acabamento que lhe confere um novo aspecto, envolvendo limpeza, pintura e eliminação de rebordas. O processo de recauchutagem considerado neste estudo foi o “processo a quente”.

Os dados utilizados, alusivos às matérias-primas, foram obtidos recorrendo a várias fontes, como artigos científicos consultados no decorrer do estudo, informações fornecidas pela *Recipneu*, e foram ainda utilizados dados que se encontravam disponíveis na base de dados do *software Umberto*.

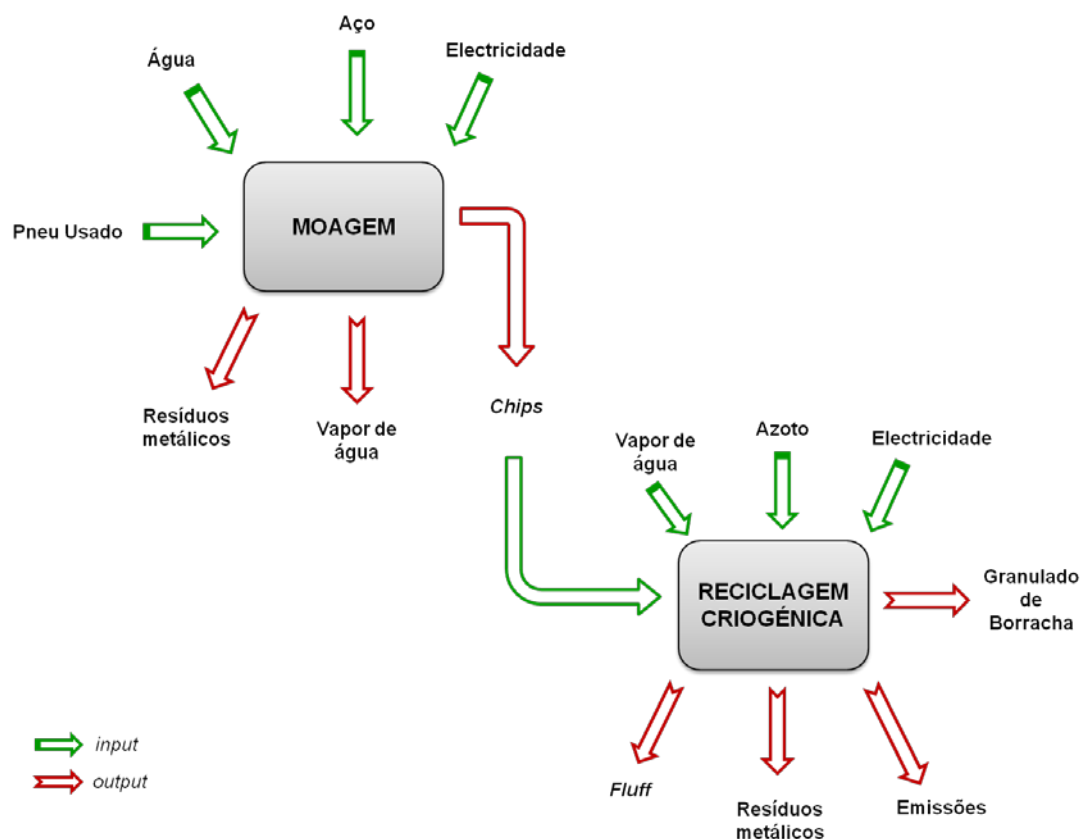


Figura 4.1 - Diagrama geral do sistema de reciclagem de pneus usados e produção de granulado de borracha

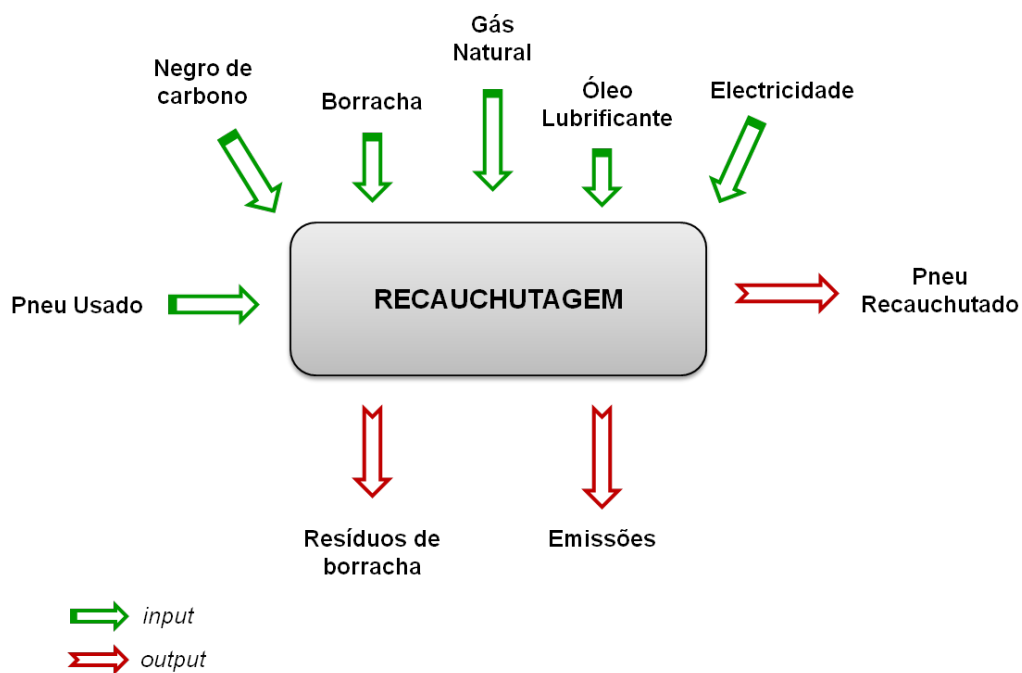


Figura 4.2 - Diagrama geral do sistema de recauchutagem de pneus usados

Condições de fronteira, limitações e pressupostos gerais

Para a realização da ACV *streamlined* foram obtidos, em primeiro lugar, dados nacionais relativos à produção de granulado de borracha, à reciclagem criogénica, e à recauchutagem. Os impactes considerados são relativos aos dois processos de valorização de pneus usados comparados no estudo, ou seja, o impacte da reciclagem criogénica com produção de granulado de borracha e a recauchutagem através do processo a quente.

De salientar que foi considerada a realidade nacional, porém na inexistência de informação o âmbito geográfico foi aumentado recorrendo a valores europeus ou de outros países europeus. Na ausência de informação mais detalhada por parte de algumas entidades, essencialmente nacionais, recorreu-se a publicações científicas e à base de dados do próprio *software* para colmatar a escassez de informação necessária ao desenvolvimento do estudo.

No presente estudo não foram considerados os impactes dos equipamentos, a etapa da recolha, o destino dos restantes *outputs* dos processos (reciclagem da fracção metálica, ou encaminhamento para aterro do *fluff*), uma vez que se tratava de uma ACV *streamlined* e porque o objectivo se prendia apenas com a comparação das tecnologias de valorização de pneus usados, reciclagem criogénica e recauchutagem. Da mesma forma, não foram considerados os transportes das matérias-primas até Portugal, tendo sido considerado que estes bens existiam no território nacional.

Foi considerada a realidade nacional para ambos os processos, recolhendo toda a informação disponível. No entanto, quando não havia informação, o âmbito geográfico foi aumentado, tendo-se utilizado valores europeus ou de outros países da Europa.

4.2.3 Qualidade dos dados

O estudo focalizou-se apenas nos pneus em fim de vida que foram encaminhados para a reciclagem ou para recauchutagem. Ou seja, não foram contabilizados os módulos de transporte de matérias-primas até ao local de produção, nem o transporte dos produtos obtidos da valorização para as estações de tratamento.

A qualidade de dados relativos à recolha de pneus usados, matérias-primas para a reciclagem e recauchutagem, e distribuição de granulado de borracha e recauchutados é baixa, uma vez que os dados primários estiveram indisponíveis durante o estudo. Portanto, existe alguma incerteza associada devido à ausência de dados reais.

Na recauchutagem, os dados primários estiveram igualmente indisponíveis, tendo-se recorrido a diversas fontes de dados utilizados noutros estudos, de modo a gerar valores médios. A confiança

dos dados é reduzida pela extrapolação de alguns dados, como pneus de diferentes dimensões e estudos diferentes. De um modo geral, a qualidade dos dados referentes à reciclagem é média, e na recauchutagem é baixa.

4.3 Inventário do ciclo de vida

A apresentação do inventário do ciclo de vida é feita de acordo com as diferentes etapas da reciclagem do pneu usado e as diferentes etapas da recauchutagem. No processo da reciclagem foram consideradas duas etapas: a trituração mecânica (*moagem*) e a reciclagem criogénica. Para a ACV, os dados recolhidos e utilizados correspondem a valores apenas de veículos ligeiros.

4.3.1 Reciclagem – Produção de granulado de borracha

Fase 1 – Processo trituração mecânica

O primeiro passo da reciclagem criogénica é o processo de produção de pedaços de pneu de, aproximadamente, sete a dez cm (*grinding*), acompanhado da remoção da fração metálica. O equipamento é um triturador de eixo duplo com um único corte, os *inputs* do sistema são a eletricidade, a água, o óleo e o aço.

Os dados utilizados foram retirados do trabalho de Corti e Lombardi (2004), intitulado de *End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA*, cujo processo é bastante semelhante ao praticado em Portugal, tendo estes sido validados pela recicladora nacional Recipneu. Os dados são referentes a uma fábrica que processa, aproximadamente, cerca de três toneladas por hora de pneus usados, sendo o consumo de electricidade, o maior *input*, estimado a partir da potência instalada e do horário operacional dos equipamentos. As quantidades de *inputs* e *outputs* do processo de trituração são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Entrada e saídas da fase de trituração (Corti e Lombardi, 2004)

Entradas	Saídas	Quantidade	Unidades
Pneus Usados	-	1 000	kg
Electricidade	-	170 000	kJ
Água	-	150	kg
Aço	-	0,230	kg
-	Fragmentos de pneus	966	kg
-	Resíduos de ferro	34	kg
-	Resíduos de aço	0,230	kg
-	Vapor de água	150	kg

Fase 2 – Processo de pulverização criogénica

Neste processo há uma redução ainda maior dos pedaços de pneu, em condições criogénicas, pelo qual é mais fácil de obter o tamanho desejado. O processo criogénico consiste no arrefecimento dos polímeros da borracha, por acção do azoto líquido, que posteriormente são submetidos a forças de alto impacto. Assim, os *chips* resultantes do processo anterior (trituração) atravessam um túnel submergidos em azoto líquido, a uma temperatura de -196 °C. Os *chips* “congelados” são sujeitos a fortes impactos, em moinhos de martelos especiais, estilhaçando-os em pequenos grânulos de diferentes dimensões. Apesar destes martelos atingiremos *chips* com elevada força e numa fracção de segundos, este processo não degrada química, nem termicamente as cadeias moleculares dos polímeros de borracha, bem como não degrada o seu estado de vulcanização (Recipneu, 2012). De seguida existe a separação densimétrica dos têxteis, a separação magnética do aço e a secagem da borracha granulada recorrendo ao vapor de água, obtido através da queima de gás natural.

Foram também utilizados, para este processo, os dados do artigo Corti e Lombardi (2004). Na Tabela 4.2 encontram-se os valores estimados a partir da recolha de dados por parte dos autores do artigo.

Tabela 4.2 – Entradas e saídas do processo da fase de pulverização criogénica (Corti e Lombardi, 2004)

Entradas	Saídas	Quantidade	Unidades
Pedaços de pneu	-	1 000,0	kg
Electricidade	-	180 000,0	kJ
Azoto	-	703,0	kg
Vapor de água	-	38 759,0	kJ
-	Granulado de borracha	675,0	kg
-	Resíduos de ferro	265,0	kg
-	Fibras têxteis	60,0	kg
-	Azoto	703,0	kg
-	Vapor de água	38 759,0	kJ

Relativamente a processos auxiliares foram também considerados dados referentes à electricidade consumida em Portugal, para o ano de 2010, e a extracção de gás natural e respetivo uso para a produção de gás natural, existentes na biblioteca do *software* Umberto. A electricidade consumida em 2010 era composta por: carvão (28,10%), fuelóleo (8,37%), gás natural (30,50%), biomassa (0,55%), hidroelétrica (25,00%), resíduos (7,00%), geotérmica (0,33%), e eólica (0,15%) (ProBas, 2010).

4.3.2 Produção de pneus recauchutados

O processo considerado neste estudo, foi o “processo a quente”. Este processo, e de acordo com o relatório do IGAOT (2009), consiste na colocação da borracha sobre o pneu raspado, auxiliado de uma extrusora, sendo posteriormente colocado num molde individual com o desenho do piso. O molde é aquecido por vapor de água a temperaturas superiores a 150 °C. Embora gere menos resíduos de madeiras e plásticos que o processo a frio, do ponto de vista ambiental, este processo consome bastante energia (IGAOT, 2009).

Para o processo da recauchutagem os dados utilizados foram recolhidos de fontes secundárias, ou seja, através de artigos científicos. Com o objectivo de obter valores mais próximos da realidade procurou-se estabelecer contactos com algumas recauchutadoras nacionais, no entanto sem êxito, daí ter-se recorrido a fontes de diferentes estudos.

Desta forma, os dados alusivos às principais entradas e saídas foram recolhidos do relatório *Carbon footprint of tyre production – new versus remanufactured* (Pecnik, 2008). Os dados utilizados neste relatório foram fornecidos pela empresa Vaculug, uma das maiores recauchutadoras de pneus de veículos ligeiros e comerciais no Reino Unido. O tipo e as quantidades de materiais de entrada e de saída estão apresentados na Tabela 4.3.

A electricidade consumida no processo da recauchutagem tem igual composição à referida anteriormente para a reciclagem. Dada a ausência de dados por parte de recauchutadoras, recorreu-se a processos auxiliares de acordo com a biblioteca do *software* Umberto. A quantidade de gás natural e electricidade usada foi calculada com base no relatório *Carbon footprint of tyre production – new versus remanufactured*. A borracha natural resulta do processamento do látex extraído das árvores de seringueira. Esta é uma árvore nativa da Amazónia, porém foi também adaptada para as regiões tropicais da Ásia. Relativamente à borracha sintética, esta é produzida através de petróleo, mas, embora seja semelhante à natural, não possui a mesma resistência (Rebouças, 2010). Relativamente aos processos de produção da borracha sintética e do negro de carbono, os *inputs* e *outputs* foram retirados dos documentos da organização PROBAS (2000) e de Buxbaum (1998), respectivamente.

Tabela 4.3 - Entrada e saídas do processo de recauchutagem de pneus (Pecnik, 2008)

Entradas	Saídas	Quantidades	Unidades
Pneus usados	-	1000,0	kg
Borracha natural	-	11,3	kg
Borracha sintética	-	124,5	kg
Electricidade	-	1859773,6	kJ
Negro de carbono	-	113,2	kg
Gás natural	-	12,6	kg
Plastificante (óleo lubrificante)	-	67,9	kg
Outros materiais	-	18,9	kg
-	Pneus recauchutados	1147,2	kg
-	Resíduos de borracha	188,7	kg

Neste processo não foram considerados outros materiais por não se conhecer ao certo o que são e por se encontrarem abaixo de 2% da unidade funcional, que foi assumido como limite. Para os cálculos dos impactes foram considerados processos auxiliares de *input*, nomeadamente o processo de:

- Produção da electricidade e o seu consumo em Portugal;
- Extracção de gás natural e sua queima na produção de calor;
- Produção de borracha sintética;
- Produção de óleo lubrificante;
- Produção de negro de carbono.

4.4 Avaliação do impacte ambiental

4.4.1 Modelação do ciclo de vida

O procedimento de modelação foi efetuado recorrendo ao *software* Umberto, desenvolvido pela empresa alemã *ifu Hamburg GmbH*, e que compreende diversas bases de dados de distintos processos e fluxos. Ainda que a informação sobre os processos de produção da maioria dos componentes seja muito reduzida, procurou-se, dentro das limitações existentes, a escolha de processos aproximadamente equivalentes aos processos em estudo, e quando tal não era possível foram realizadas algumas considerações de modo a que se assemelhasse ao processo pretendido.

No processo de modelação da reciclagem foi criado um sistema, com dois processos que correspondem à produção de granulado de borracha: a trituração mecânica e pulverização criogénica. No processo de modelação da recauchutagem o sistema compreende processos de extracção de matérias-primas como o negro de carbono, electricidade, gás natural, borracha sintética e queima do gás natural.

A avaliação de impacte na ACV examina a massa e a energia de entrada e saída dos dados do inventário no sistema, traduzindo-os de modo a identificar a sua possível relevância ambiental e significância. Esta tradução utiliza indicadores numéricos, sempre que for possível, para assuntos específicos ou categorias que reflectem de alguma forma o sistema ambiental. Estes indicadores constituem um perfil de cargas ambientais e de depleção de recursos de um sistema. Com uma ponderação e análise mais detalhada do perfil, é possível obter uma perspectiva adicional útil sobre a importância ambiental numa ou mais áreas gerais de recursos, no meio ambiente e na saúde humana (Buxbaum, 1998; Corti e Lombardi, 2004).

No Anexo A e B é possível verificar os esquemas de modelação do *software* Umberto para a reciclagem criogénica e recauchutagem, respectivamente.

4.4.2 Impactes ambientais

Os resultados da avaliação de impacto ambiental, referentes às duas categorias de impacto estudadas para os sistemas de valorização dos pneus usados, encontram-se no Anexo C e D. A Tabela 4.4 e a Figura 4.3 apresentam os resultados finais, expressos pela unidade funcional.

Tabela 4.4 – Resultados da avaliação de impactes ambientais

Categoria de impacto	Reciclagem	Recauchutagem	Unidades
Depleção de recursos abióticos	1,2	8,7	kg Sb eq
Aquecimento global	217,6	1202,8	kg CO ₂ eq

Os valores do desempenho ambiental de ambos os sistemas de valorização de pneus usados estão representados na Figura 4.3, tendo sido considerado todo o ciclo de vida de cada sistema.

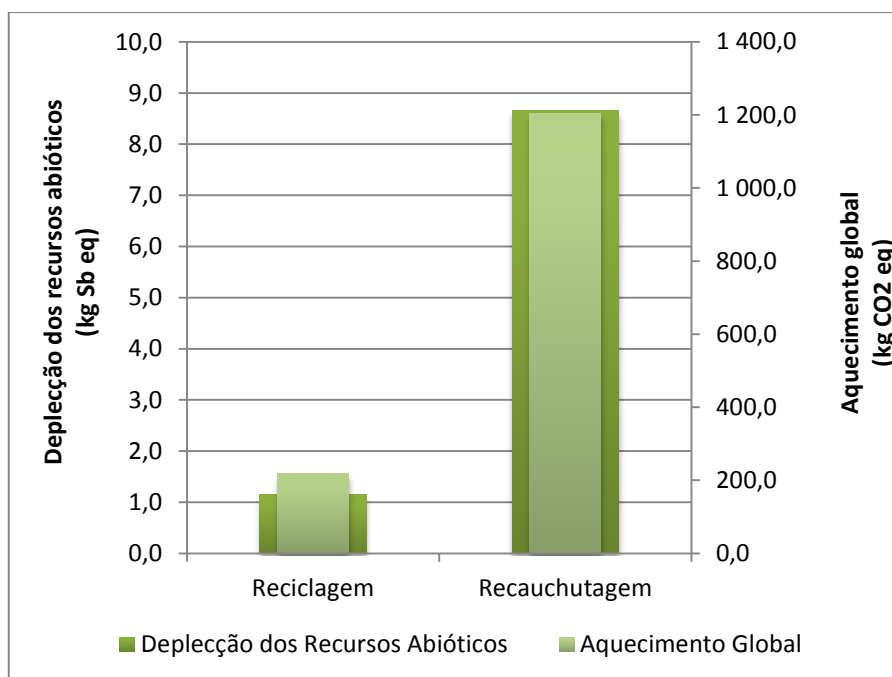


Figura 4.3 - Avaliação dos impactes ambientais da reciclagem e da recauchutagem

Analisando a Figura 4.3 destaca-se que a recauchutagem apresenta maiores contribuições, tanto na depleção de recursos abióticos, como no aquecimento global. Esta contribuição resulta do processo de produção da borracha sintética, produção de negro de carbono e um maior consumo de electricidade.

Quando comparada com a recauchutagem, o processo da reciclagem apresenta menos impactes em ambas as categorias, sendo que, das fases envolvidas na reciclagem, a trituração mecânica e a pulverização criogénica são as que mais contribuem para os impactes ambientais em estudo, como se pode analisar na Figura 4.4. Pelo inventário do ciclo de vida realizado verifica-se que a reciclagem conta com um elevado consumo de energia eléctrica, e um impacte significativo ao nível da extracção do gás natural, gerando assim os impactes destas fases no processo de reciclagem.

O consumo de vapor de água foi calculado a partir do valor de gás natural, recolhido da biblioteca do *software* Umberto, necessário para a produção de vapor, e considerou-se que o gás natural tem uma densidade de $0,84 \text{ kg/m}^3$. A produção de negro de carbono envolve uma reacção do ar com um combustível fóssil aquecido num forno a gás natural, e por isso, a densidade do ar considerada foi de 1 kg/m^3 , tendo sido a densidade do gás natural a mesma que na reciclagem, segundo Buxbaum (1998). Na fase de trituração mecânica e criogénica, os impactes são derivados da produção de electricidade, tendo sido considerada, nesta última fase, a electricidade como input e a electricidade necessária para produzir o azoto.

Na Figura 4.4 apresentam-se os resultados da avaliação dos impactes ambientais obtidos para cada uma das fases do processo de reciclagem criogénica de pneus usados.

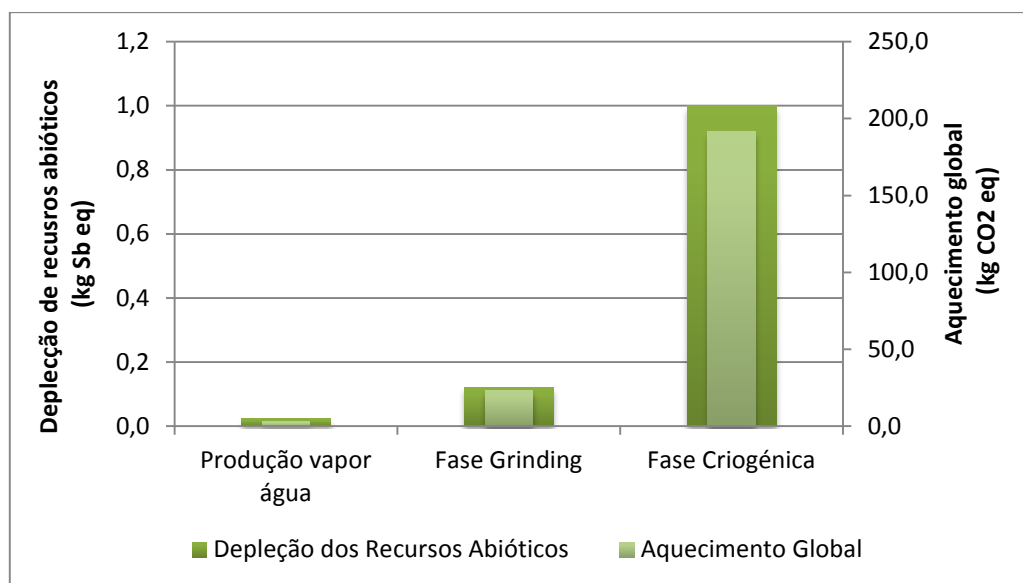


Figura 4.4 - Avaliação dos impactes ambientais nas diferentes fases da reciclagem

O resultado aqui obtido não é próximo do valor obtido no artigo científico consultado (Corti e Lombardi, 2004), pois o processo de produção de electricidade, de azoto, de extracção de gás natural em Itália não é igual ao utilizado em Portugal. No presente estudo também não foi considerado o transporte de matérias-primas até à unidade de tratamento como referido anteriormente.

Na Tabela 4.5 apresenta-se a contribuição que a produção da electricidade, *input* com maior significância e necessário para a produção do granulado de borracha, tem no processo de reciclagem. Na fase de trituração mecânica, a electricidade representa, aproximadamente 10,5% nas categorias de impacte da depleção de recursos abióticos e aquecimento global. Na fase criogénica, a produção de electricidade gera um contributo, para as mesmas categorias de impacte, de aproximadamente 87,5%.

Tabela 4.5 – Contribuição do consumo de electricidade no processo de reciclagem criogénica

Categoria de impacte	Trituração Mecânica	P. Criogénica
Depleção recursos abióticos	10,6%	87,3%
Aquecimento global	10,7%	88,0%

Relativamente ao processo de recauchutagem, a produção de borracha sintética, a produção de negro de carbono e a produção de electricidade são as que mais contribuem para o aquecimento global, sobretudo devido às emissões de óxido nitroso (N_2O), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4). Os materiais que mais contribuem para a depleção de recursos abióticos são os combustíveis fósseis e o gás natural.

O negro de carbono resulta da reacção entre um combustível fóssil, nomeadamente petróleo, com uma quantidade limitada de ar de combustão, a temperaturas bastante elevadas (1320 °C a 1540 °C). Ou seja, uma quantidade de petróleo é aquecida e injectada, continuamente, na zona de combustão de um forno a gás natural, sendo decomposto e originando o negro de carbono (USEPA). Desta forma, a produção do negro de carbono envolve a queima de gás natural e consumo de fuelóleo, aumentando as emissões de gases com efeito de estufa.

No processo de recauchutagem, a depleção de recursos é afectada, essencialmente, pelo fuelóleo usado na produção de negro de carbono, pelos óleos lubrificantes e pelo consumo de electricidade. Portanto, todos os processos que consomem combustíveis fósseis têm uma expressão significativa, embora seja a produção de fuelóleo a mais expressiva, ao nível da depleção de recursos abióticos. Assim, o aquecimento global é afectado, maioritariamente, pela produção de negro de carbono e borracha sintética (Figura 4.5). O aquecimento global na recauchutagem é tao elevado devido à produção de negro de carbono e de borracha sintética, uma vez que envolvem grandes quantidades de GEE. Nesta ACV simplificada não foram considerados dados referentes ao transporte até à unidade de tratamento, nem das matérias-primas nem dos processos intermédios.

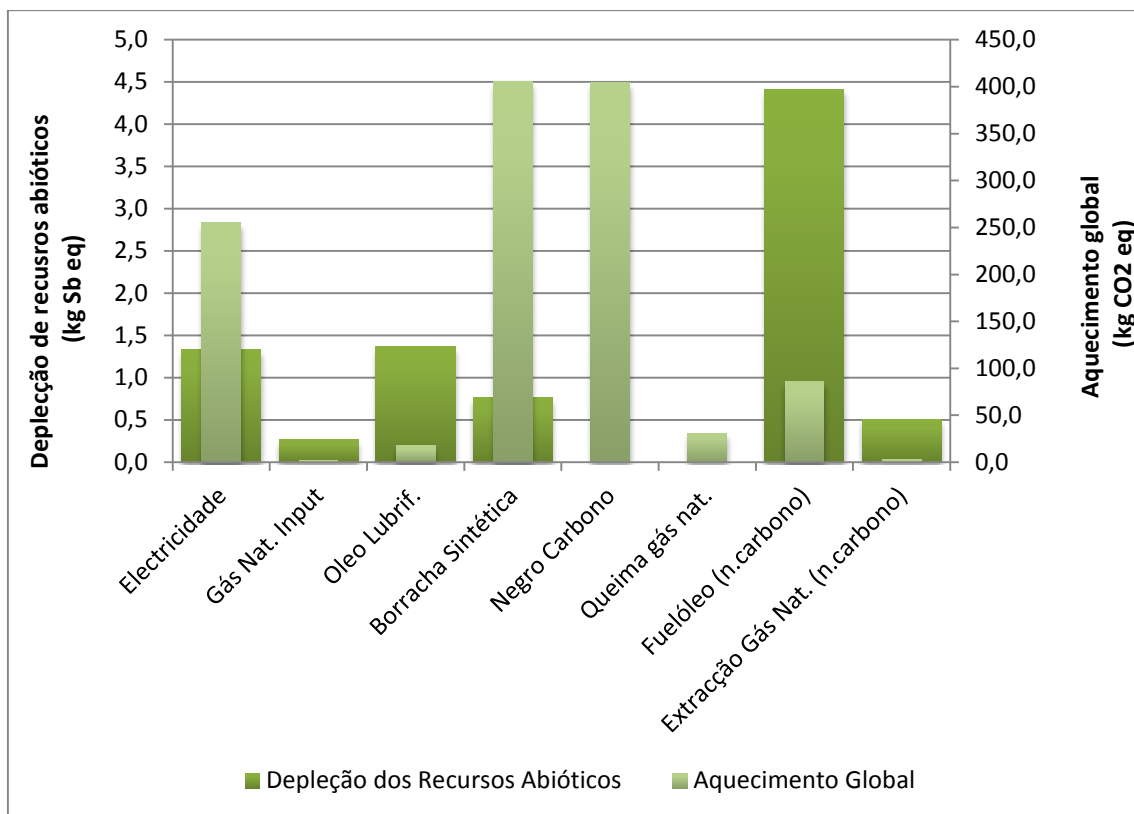


Figura 4.5 - Avaliação dos impactes ambientais nas diferentes fases da recauchutagem

4.4.3 Análise de sensibilidade

Foi realizada uma análise de sensibilidade para identificar a significância da ausência de dados para processos no sistema do produto. O Grupo de Controlo e Gestão (n.d.) da Universidade de Coimbra, refere que a análise de sensibilidade permite identificar as alterações verificadas na solução do problema quando se verificam ligeiras variações num dos parâmetros do modelo, sem ser necessário resolver todo o problema de novo. Esta análise é utilizada para medir as alterações nos resultados quando são introduzidas alterações a estes na fase de inventário com maior impacte (Ferreira, 2004). Ou seja, pretende-se comparar os resultados obtidos anteriormente com os resultados que serão obtidos com as alterações provocadas.

A análise de sensibilidade foi realizada para os processos com maior contribuição nas duas categorias de impacte avaliadas: a produção de electricidade no processo de reciclagem, e a produção de negro de carbono no processo de recauchutagem. Optou-se por esta escolha por serem valores reais estando sujeitos a incertezas menores, e por serem os resultados mais significativos. Os impactes foram calculados para uma diminuição e um aumento de 10%, 20% e 30% no consumo da electricidade e produção de borracha sintética. Na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados

obtidos relativamente a uma diminuição de 10%, 20% e 30% no consumo de electricidade e produção de borracha sintética para os dois processos em estudo.

Tabela 4.6 - Análise de sensibilidade para a diminuição do consumo de electricidade na reciclagem e produção de negro de carbono na recauchutagem

	Reciclagem				Recauchutagem				Unidades
	Valor base	-10%	-20%	-30%	Valor base	-10%	-20%	-30%	
Depleção de recursos abióticos	1,2	1,1	1,1	1,1	8,7	8,1	7,7	7,2	kg Sb eq
Aquecimento global	217,6	212,9	208,1	203,5	1 202,8	1 113,0	1 104,3	1 055,0	kg CO ₂ eq

Analisando a Tabela 4.6, verifica-se que a diminuição de 30% no consumo de electricidade, no processo da reciclagem, representa uma redução de, aproximadamente 7%, tanto na depleção de recursos abióticos como no aquecimento global. Uma diminuição de apenas 10% não reproduz efeitos significativos, sendo inferior a 3%. Foi feita, igualmente, a mesma análise para o aumento de 10, 20 e 30% (Tabela 4.7) no consumo de electricidade, no entanto não se registou qualquer vantagem.

Relativamente à recauchutagem, é possível reduzir cerca de 17% no impacte causado na depleção de recursos abióticos e de 12% no aquecimento global, caso se diminua a produção de negro de carbono em 30%. Analogamente à reciclagem, foi analisada a sensibilidade para um aumento de 10, 20 e 30% (Tabela 4.7) e também não se verifica qualquer vantagem.

Tabela 4.7 – Análise de sensibilidade para o aumento consumo de electricidade na reciclagem e produção de negro de carbono na recauchutagem

	Reciclagem				Recauchutagem				Unidades
	Valor base	+10%	+20%	+30%	Valor base	+10%	+20%	+30%	
Depleção de recursos abióticos	1,2	1,2	1,2	1,2	8,7	9,1	9,6	10,1	kg Sb eq
Aquecimento global	217,6	222,3	227,0	231,8	1 202,8	1 252,0	1 301,3	1 350,5	kg CO ₂ eq

Após a análise de sensibilidade verifica-se que os valores dos impactes associados na recauchutagem continuam acima dos valores dos impactes da reciclagem. É de salvaguardar que os dados recolhidos para a reciclagem de pneus usados foram retirados de um artigo científico cujos processos eram semelhantes ao estudado. No entanto, na recauchutagem, uma vez que os dados foram retirados de diversos artigos, principalmente no diz respeito à produção de negro de carbono e produção de borracha sintética, estes podem não representar da melhor forma a realidade nacional.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO

5.1 Síntese conclusiva

O estudo realizado para a elaboração desta dissertação pretendeu comparar duas tecnologias de valorização de pneus usados, a reciclagem criogénica e a recauchutagem. Desta comparação verificou-se que a recauchutagem apresenta maior impacto ambiental do que a reciclagem, sobretudo, devido às diversas queimas de combustíveis fósseis envolvidas na produção de *inputs*, que emitem GEE, e à extracção de matérias-primas desse combustível.

Ao comparar os dois processos de valorização dos pneus usados, a reciclagem criogénica e a recauchutagem, podemos constatar que a recauchutagem tem um impacto ambiental ligeiramente superior à reciclagem criogénica na categoria de depleção de recursos abióticos. Esta variação advém do consumo e queima dos combustíveis fósseis necessários, na produção de borracha sintética, negro de carbono e electricidade. Estes processos de tratamento de resíduos envolvem a extracção de gás natural e de petróleo, e produção de fuelóleo, o que consequentemente provoca inúmeras emissões atmosféricas de dióxido de carbono e monóxido de carbono.

Em termos de impactes no aquecimento global, a reciclagem criogénica contribui com cerca de 217 kg CO₂ equivalente, sendo este valor bastante inferior ao da recauchutagem (1202 kg CO₂ equivalente). Estes resultados da reciclagem advêm da produção de electricidade que é utilizada em todo o processo. Relativamente ao consumo de recursos naturais, a reciclagem não tem consumos significativos, uma vez que neste tipo de reciclagem o consumo de combustíveis fósseis é reduzido, não existindo a necessidade de, por exemplo, produzir borracha como na recauchutagem. Na reciclagem, o processo com maior contributo para a depleção de recursos abióticos e aquecimento global é a produção de electricidade e extracção de gás natural para produção de vapor de água. O aquecimento global na recauchutagem é tao elevado devido essencialmente à produção de negro de carbono e borracha sintética, que envolvem grandes quantidades de GEE. Na análise realizada ao processo da reciclagem e recauchutagem não foram considerados dados referentes ao transporte até à unidade de tratamento, nem das matérias-primas nem dos processos intermédios.

A análise de sensibilidade envolvia a redução em 10%, 20% e 30% do processo intermédio com maior contribuição na depleção de recursos abióticos e aquecimento global. No caso da reciclagem foi o consumo de electricidade o mais relevante, verificando-se uma redução de 7% no valor de depleção de recursos abióticos e aquecimento global, para uma redução de 30% do consumo. No caso da recauchutagem foi na produção de negro de carbono, obtendo-se uma redução de 17% e 12% nos indicadores depleção de recursos abióticos e aquecimento global, respectivamente.

No processo da recauchutagem, este estudo de ACV *streamlined* do pneu usado mostra-nos que, para as duas categorias de impacto analisadas (depleção de recursos abióticos e aquecimento global), o processo da produção de negro de carbono, borracha sintética, óleo lubrificante e

electricidade são os responsáveis pela maior expressão de emissões de óxido nitroso, metano, dióxido de carbono e monóxido de carbono afectando o aquecimento global. A produção de fuelóleo, seguida do óleo lubrificante e electricidade são responsáveis pela maior quota-parte da depleção de recursos abióticos. Quanto à reciclagem criogénica, é a produção da electricidade que mais contribui para as categorias de impacte, embora a extracção de gás natural para produção de vapor de água também tenha alguma importância. Ainda assim, comparando com a recauchutagem, é um processo bastante viável ao nível dos recursos abióticos e emissões de GEE, não existindo necessidade de extrair tanta matéria-prima, nem tantas queimas de combustível fóssil. Desta forma, e face aos resultados obtidos, considerou-se que a reciclagem é o melhor processo de tratamento uma vez que tem menores impactes.

5.2 Limitações do trabalho

A maior dificuldade encontrada no estudo diz respeito à escassa informação disponível. De relembrar que os esforços feitos junto das recauchutadoras e recicladoras nacionais, para cederem informações referentes aos seus consumos e emissões não deram, qualquer fruto. Por isso, foi necessário recorrer a diversos artigos e relatórios científicos existentes sobre esta temática, existindo a possibilidade dos resultados obtidos, para o caso da recauchutagem, não estarem muito próximos da realidade portuguesa. Teria sido importante recorrer a dados consistentes de processos semelhantes, especialmente no processo da recauchutagem, de modo a que as conclusões fossem mais próximas da realidade.

A ACV é uma ferramenta útil na gestão uma vez que permite uma melhor compreensão dos impactes no ambiente e na saúde humana, por parte dos responsáveis pelos processos de tomada de decisão, permitindo igualmente fazer uma comparação entre os competidores do produto ou processo. A ACV caracteriza-se por ter uma perspectiva holística e integrada, uma vez que considera todas as fases do ciclo de vida do produto. No entanto, esta avaliação deverá ser associada a outras metodologias, como Análise de Custo-Benefício, de modo a completar a informação relativamente a um dado produto ou processo.

Normalmente, a ACV pode ser muito “exigente” em termos de tempo e dados havendo assim a necessidade de aplicar uma metodologia de ACV mais simplificada, ou seja a *streamlined* ACV, como foi o caso deste estudo. A simplificação da ACV ocorre de uma forma ou de outra na maioria das ACV sendo umas mais completas em dados ou estágios ou mesmo na avaliação de impacte que outras análises. Neste estudo foram omissos alguns estágios do ciclo de vida por ausência de dados e as categorias de impacte analisadas foram limitadas estudando apenas duas das categorias existentes. Através da *streamlined* ACV é também possível recorrer a dados de estudos anteriores. Embora a ACV simplificada não permita avaliar o impacte ambiental da existência de um produto, esta permite que o impacte ambiental das actividades de fabricação seja avaliado, bem como a eficiência do processo, determinando também os pontos críticos para possíveis melhorias. No entanto, ao não

considerar determinadas fases do ciclo de vida e ao não avaliar os impactes em todas as categorias de impacte dão a sensação que a ACV está algo “incompleta”, sendo então uma desvantagem da sua simplificação, nomeadamente por não considerar os impactes ambientais da recauchutagem, pois evita a produção integral de um novo pneu, assim como no caso da reciclagem criogénica que evita a produção de granulado de borracha virgem. Porém, a realidade é que neste estudo tornar-se-ia complexa a inclusão de todos os dados e processos do ciclo de vida devido, mais uma vez, à ausência de informação.

Reforçando, a grande dificuldade sentida ao longo do estudo realizado foi a falta de informação por parte das empresas com as quais foi estabelecido contacto. Esta ausência é associada à resistência dos fornecedores em partilhar informação fundamental para a realização de estudos de Análise do Ciclo de Vida. Desta forma, torna-se mais complicado conseguir implementar ferramentas de gestão rumo ao desenvolvimento sustentável.

5.3 Sugestão para futuras investigações

Seria interessante que, incluindo a reciclagem mecânica, se realizasse uma ACV completa para ambos os processos de valorização de pneus usados. Desta forma poderia ser possível avaliar todo o sistema de gestão da Valorpneu, de modo a perceber, por exemplo, onde poderiam ser realizadas melhorias na recolha de pneus usados, no encaminhamento dos mesmos, no tipo de transporte utilizado, localização dos pontos de recolha e tratamento. Na recauchutagem, a ACV completa também seria interessante de modo a compreender que outros impactes tem este processo a nível ambiental, bem como compreender a forma como é feito o transporte e extracção de outras matérias-primas, por exemplo.

Seria igualmente interessante a realização de uma avaliação dos custos para a reciclagem criogénica e para a recauchutagem, a fim de perceber qual é a mais viável a nível económico. Neste estudo também não foram considerados os efeitos dos processos na saúde humana. Assim, de futuro um estudo mais abrangente destas duas técnicas permitia compreender melhor os pontos de vista técnicos, económicos e os riscos que cada um tem na saúde humana.

CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFIA

- APA (2012a). *Dossier temático pneus usados - nível mais avançado. Tema 6 - Pneus Usados*. Agência Portuguesa do Ambiente. Amadora. Acedido em Abril de 2012, em: http://www.apambiente.pt/politicasambiente/Residuos/dossiers/Documents/pneus/PU_mais_basico_P.pdf
- APA (2012b). *Dossier temático pneus usados - nível mais básico. Tema 6 - Pneus Usados*. Agência Portuguesa do Ambiente. Amadora. Acedido em Abril de 2012, em: <http://www.apambiente.pt/politicasambiente/Residuos/dossiers/Paginas/default.aspx>
- Azevedo, R. (2009). *Análise do ciclo de vida do produto - instrumento de gestão ambiental*. Acedido em: Setembro de 2012, em: <http://naturlink.sapo.pt/article.aspx?menuid=6&cid=34613&bl=1&viewall=true>.
- Beck, R. W. (2005). *Analysis of New York scrap tires markets*. New York State Department of Economy Development. New York. Acedido em: Abril de 2012, em: <http://esd.ny.gov/businessprograms/Data/SecondaryMarketInfo/AnalysisofNewYorkScrapTireMarkets-2005.pdf>
- Birkeland, J. (2002). *Design for sustainability: a sourcebook of integrated, eco-logical solutions*. Earthscan Publications. Acedido em: Setembro de 2012, em: <http://books.google.pt/books?id=Ap-2QgAACAAJ>
- BLIC (2003). *Promotions of responsible management of used tyre Industry – Used tyres: a Valuable resource with a wealth of potencial*. Bruxelas. Acedido em Abril de 2013, em: http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf_comments/blic_annex.pdf
- Buxbaum, G. (1998). *Organic chemical process industry. Industrial Inorganic Pigments*. Germany: 154.
- Caetano, M. (2012). "Processos de recauchutagem". Acedido em: Fevereiro de 2013, em: http://www.ctb.com.pt/?page_id=7980
- Campos, P. (2006). *Aproveitamento industrial da borracha reciclada de pneus usados*. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Braga.
- Chang, N.-B., Pires, A., and Martinho, G. (2013): Chapter 29: Environmental Legislation for Solid Waste Management in EU Countries via the Use of Economic and Policy Instruments. In *Encyclopedia of Environmental Management*, Ed, Jorgensen, S. E. (Taylor & Frances Group) Volume II - page 892 - 913.

- Corti, A. e L. Lombardi (2004). *End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA*. *Energy* **29**(12–15): 2089-2108.
- Crawford, R. (2011). *Life cycle assessment in the built environmental*. Spon Press. New York, USA.
77. Acedido em: Junho de 2013, em: <http://books.google.pt/books?id=ZHYvwCEy8k8C&pg=PR7&dq=streamlined+life+cycle+assessment+limitations&hl=pt-PT&sa=X&ei=cTvEUayfIMSQ7AbD54GQBg&ved=0CC0Q6AEwAA#v=onepage&q=streamlined%20life%20cycle%20assessment%20limitations&f=false>
- Curran, M. A. (2006). *Life cycle assessment: principles and practice*, U.S. Environmental Protection Agency. National Risk Management Research Laboratory – Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio. Acedido em: Agosto de 2012, em: <http://www.cs.ucsb.edu/~chong/290N-W10/EPAonLCA2006.pdf>
- Decreto-Lei n.º 43/2004 , de 2 de Março (2004). Diário da República — I Série-A N.º 52 — 1108-1109. Lisboa
- Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho (2011). Diário da República, 1.ª série — N.º 116 — 3251-3300. Lisboa
- Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril (2001). Diário da República — Iª Série-A N.º 82 — 2046-2050. Lisboa
- Decreto-Lei n.º 152/2002 de 23 de Maio (2002). Diário da República — Iª Série-A N.º 119 — 4680-4699. Lisboa
- Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto (2009). Diário da República, 1.ª série — N.º 153 — 5170-5198. Lisboa
- Directiva n.º 1999/31/CE, de 26 de Abril (1999). Jornal Oficial das Comunidades Europeias.
- Directiva n.º 2008/98/CE, de 19 de Novembro (2008). Jornal Oficial da União Europeia.
- Dunn, J., Jones, R (1991). Automobile and truck tires adapt to increasingly stringent requirements. *Elastomerics* **123**: 11-18.
- ETRMA (2011a). *End of life tyres - A valuable resource with growing potential*. Bruxelas, European Tyre & Rubber - Manufactures Association. Bruxelas.
- ETRMA (2011b). *Management schemes*. European Tyre & Rubber – Manufactures association. Bruxelas. Acedido em: Abril de 2012, em: <http://www.etrma.org/tyres/ELTs/ELT-management/ELT-management-schemes>.

- ETRMA. (2011c). *Material recovery*. European Tyre & Rubber – Manufactures association. Bruxelas. Acedido em Março de 2012, em: <http://www.etrma.org/tyres/ELTs/recovery-routes-and-trends/material-recovery>.
- ETRMA. (2011d). *Producer responsibility*. European Tyre & Rubber – Manufactures association. Bruxelas. Acedido em: Abril de 2012, em: <http://www.etrma.org/tyres/ELTs/ELT-management/producer-responsibility>.
- ETRMA. (2011e). *Retreading*. European Tyre & Rubber – Manufactures association. Bruxelas. Acedido em: Março de 2012, em: <http://www.etrma.org/tyres/retreading>.
- ETRMA. (2011f). *Tax system*. European Tyre & Rubber – Manufactures association. Bruxelas. Acedido em: Abril de 2012, em: <http://www.etrma.org/tyres/ELTs/ELT-management/tax-system>.
- ETRMA. (2011g). *Tyres*. European Tyre & Rubber – Manufactures association. Bruxelas. Acedido em Fevereiro de 2012, em: <http://www.etrma.org/tyres>.
- ESKOM. (2011). *Avoid stretching energy cost – achieving optimal energy efficiency in rubber processing*. ESKOM Integrated Demand Management. Acedido em: Setembro de 2012, em: http://www.eskomidm.co.za/wp-content/themes/eskom/pdfs/Industrial/ESKD128255_DSM_Rubber_Brochure_December_2010.pdf
- Ferrão, P., Ribeiro, P., Silva, P (2008). A management system for end-of-life tyres: A Portuguese case study. *Waste Management* **28**(3): 604-614.
- Ferrão, P. (1998). *Introdução à gestão ambiental: a avaliação do ciclo de vida de produtos*. Instituto Superior Técnico - UTL. IST press. Lisboa
- Ferreira, J. (2004). *Análise de ciclo de vida dos produtos*. Gestão Ambiental. Instituto Politécnico de Viseu. Viseu.
- Freire, F. ., Reis, C., Ferrão, P., Thore, S. (2000). Life cycle analysis applied to the portuguese used tire market. *Journal of Passenger Car. Mechanical Systems, SAE Transations* **109**(6): 1980-1988.
- Gomes, A. (2009). *Chips de pneus – substituto de brita calcária em aterros sanitários*. Dissertação de Mestrado, FCT – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Gomes, M. (2012). *Vulcanização*. Rubberpedia – all about rubber! Acedido em: Fevereiro de 2012, em: <http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao/vulcanizacao.php#top>.
- Goodyear. (2012). *Fabricar um pneu*. Acedido em: Abril de 2012, em: http://www.goodyear.eu/po_pt/tire-advice/tire-information/make-a-tire.jsp.

- Grupo de Controlo e Gestão (n.d.). *Análise de sensibilidade*. Acedido em: Abril de 2013 da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, em: http://gestao.dem.uc.pt/gestao_industrial/mad/Vol2.pdf
- Hird, A. (2002). *Tyre waste and resource management: a mass balance approach*. VIRIDIS. Acedido em: Setembro de 2012, em: <http://www.massbalance.org/downloads/projectfiles/1352-00077.pdf>
- Horne, R., Grant, T., Verghese, K. (2009). *Life cycle assessment: principles practice and prospects*. CSIRO publishing. Austrália. **54**. Acedido em: Junho de 2013, em: http://books.google.pt/books?id=12o_EjzLtTgC&printsec=frontcover&hl=pt-PT&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- IGAOT (2009) Indústrias de reconstrução de pneus (recauchutagens)- Relatório temático sobre o resultado das inspeções. IGAOT - Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- IGAOT (2005). Gestão de pneus e pneus usados. Relatório de Actividades. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território - IGAOT. Acedido em: Setembro de 2012, em: http://www.igaot.pt/wp-content/uploads/2009/05/13_IGAOT_pneus_usados.pdf
- ISO (2006a). ISO 14040:2006 - Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Second edition.
- ISO (2006b). ISO14044:2006 – environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. First edition.
- Jang, J., Yoo, T., Oh, J., Iwasaki, I. (1998). Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea. *Resources, Conservation and Recycling* **22**(1–2): 1-14.
- Jiménez-González, C., Constable, D. (2011). *Green chemistry and engineering: a practical design approach*. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. **480, 482**. Acedido em: Junho de 2013, em: <http://books.google.pt/books?id=1MEsMmmNfSwC&pg=PA482&dq=streamlined+life+cycle+assessment&hl=pt-PT&sa=X&ei=S6PDUfnFMKnD7AbZ2YCoBg&ved=0CDoQ6AEwAg#v=onepage&q=streamlined%20life%20cycle%20assessment&f=true>
- Júnior, A. (2007). Conceitos e aplicações de ACV no Brasil. *XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. ENEGEP. Associação Brasileira de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Acedido em: Setembro de 2012, em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR650481_0195.pdf
- La Bruna, I. (2011). Used tyres valorisation as lightweight filler for embankments. *LCA Study - Indicators Evolution*, Eco-Innovation. Acedido em: Fevereiro de 2013, em: <http://www.rectyre.solintel.eu/pdf/d12.pdf>

- Lagarinhos, C., & Tenório, J. (2008). Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. *Polímeros* **18**: 106-118.
- Luisa (2012). *Segunda revolução industrial*. Acedido em: Novembro de 2012, em: <http://wikigeo.pbworks.com/w/page/36435160/Segunda%20Revolu%C3%A7%C3%A3o%20Industrial>
- Marcovitch, J. (2006). *Para mudar o futuro – mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais*. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo: Editora Saraiva. **30-33**. Acedido em: Abril de 2013, em: <http://books.google.pt/books?id=6wjiE3jph2wC&pg=PA30&dq=marcovitch+revolu%C3%A7%C3%A3o+industrial&hl=pt-PT&sa=X&ei=B-3AUZX0Iurb7AaW6oHwAg&ved=0CC0Q6AEwAA#v=onepage&q=marcovitch%20revolu%C3%A7%C3%A3o%20industrial&f=false>
- Mariano, L. (2010). *A Evolução dos pneus*. Nobres do Grip. Acedido em: Outubro de 2012, em: http://www.nobresdogrid.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=383:a-evolucao-dos-pneus&catid=82:coluna-tecnologia-sobre-rodas&Itemid=150.
- Mark, J., Erman, B., Roland, M. (2013). *The science and technology fo rubber*. Fourth Edition. Academic Press. **337**. Acedido em: Junho de 2013, em: <http://books.google.pt/books?id=otzx0FCPyPcC&pg=PR8&dq=vulcanization+process&hl=pt-PT&sa=X&ei=RUzCUe6dEsSP7AbA3IHwCQ&ved=0CDcQ6AEwAQ#v=onepage&q=vulcanization%20process&f=false>
- Martins, J. (n.d.). *Gestão Ambiental*, Universidade do Algarve. Acedido em: Outubro de 2012, em: <http://w3.ualg.pt/~jmartins/GestAmbiental.pdf>
- Matos, B. (2012). *Avaliação do desempenho ambiental da produção de mobiliário em Portugal*. Dissertação de Mestrado, FCT – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Mearns (n.d.) *Robert William Thomson*. Acedido em: Abril de 2012, em: <http://www.mearns.org.uk/Stonehaven/thomson.htm>.
- ME/MCOTA (2002). *Licenciamento de uma entidade gestora de pneus usados, ao abrigo do Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril*.
- Michelin. (2010). *The radial tyre*. Acedido em: Março de 2012, em: <http://www.michelintransport.com/ple/front/affich.jsp?codeRubrique=33&lang=EN#1>.
- Michelin. (2012). *O que compõe um pneu?* Acedido em: Março de 2012, em: <http://www.michelin.pt/pneus-turismo/conselhos/tudo-sobre-o-pneu/o-que-compoe-um-pneu>.
- Mtecnic. (2009). *Pneus - a história*. Acedido em: Setembro de 2012, em: <http://mtecnic.com/Artigos-Tecnicos/pneus-a-historia.html>.

- Müller, D., & Pehlken, A. (2009). Using information of the separation process of recycling scrap tires for process modelling. *Resources, Conservation and Recycling*. **54**: 140-148.
- Mullineux, N. (2004). *Light vehicle tyres*. Rapra Technology Limited. Shawbury, UK. **38**. Acedido em Junho de 2013, em: <http://books.google.pt/books?id=ciVi1cppW88C&pg=PA31&dq=tyre+production+process&hl=pt-PT&sa=X&ei=o0LCUcOFG-KL7AaprIHADw&ved=0CDQQ6AEwAQ#v=onepage&q=tyre%20production%20process&f=false>
- ONU. (2012). *A ONU e o meio ambiente*. Acedido em: Setembro 2012, em: <http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-e-o-meio-ambiente/>.
- Ost, P. (2011). *Conheça o seu pneu*. Bom Princípio – RS, Brasil. Acedido em: Abril de 2012, em: http://www.pneusost.com/portal/institucional/conheca_seu_pneu.php.
- Pecnik, G. (2008). *Carbon footprints of tyre production - new versus remanufactured*. Oxford, CRR - Center of Remanufacturing and Re-use. Oxford.
- Pehlken, A., Essadigi, E. (2005). *Scrap tire recycling in Canada*. CANMET - MTL. Acedido em: Julho de 2012, em: <http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/minerals-metals/files/pdf/mms-smm/busi-indu/rad-rad/pdf/scr-tir-rec-peh-eng.pdf>
- Pereira, F. A. (2005). *Introdução à avaliação do ciclo de vida (ACV)*. DAO/UA. Universidade do Algarve. Acedido em Março de 2013, em: <http://pt.scribd.com/doc/7404088/Introducao-a-Analise-de-Ciclo-de-Vida>
- Pereira, J. V. I. (2009). Sustentabilidade: diferentes perspectivas, um objectivo comum. *Economia Global e Gestão* **14**: 115-126.
- Pikon, K. (2012). Abiotic depletion in energy and waste management systems. *Polityka Energetyczna* **15**(1): 87-100
- PROBAS (2000). Chem-OrgGummi-EPDM-DE-2000. *Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente*
- Rebouças, F. (2010). *Reciclagem da borracha*. Acedido em Fevereiro de 2013, em: <http://www.infoescola.com/ecologia/reciclagem-da-borracha/>.
- Recipneu (2012). *Granulado criogénico - vantagens competitivas*. Recipneu – Empresa Nacional de Reciclagem de Pneus, Lda. Sines. Acedido em Março de 2012, em: <http://www.recipneu.com/artigo.aspx?cntx=wAgeX2YGtBqWiangx9mliym6lggkPBaOIur031F%2BnLv%2BADkOcl9Nhe6OQAwt7ZW>.

- Seiça. (2005). *Actividade*. Acedido em: Março de 2012, em: <http://www.seicapneus.com/actividade.htm>.
- Silva, C. (2007). Recauchutagem em Portugal. *InfoValorpneu*. Lisboa. 4. Lisboa.
- Smith, W., Hashemi, J. (2010). *Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais*. 5ª Edição. The McGraw-Hill Companies, Inc.. 377. Acedido em: Junho de 2013, em: <http://books.google.pt/books?id=HuMrler-NYsC&pg=PA377&dq=vulcaniza%C3%A7%C3%A3o+borracha&hl=pt-PT&sa=X&ei=OO7AUan3OefD7AbosYHACA&ved=0CDMQ6AEwAA#v=onepage&q=vulcaniza%C3%A7%C3%A3o%20borracha&f=false>
- Sousa, S. (2008). *Normalização de critérios ambientais aplicados à avaliação do ciclo de vida*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Tan, R. (2005). What is Life Cycle Assessment (LCA)? *Combustion Handbook - IFRF*. Acedido em: Setembro de 2012, em: <http://www.handbook.ifrf.net/handbook/cf.html?id=283>
- The Basel Convention (1999). Technical guidelines on hazardous wastes: identification and management of used tyres. The Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal. Genébra. Acedido em: Março de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/output_efile.aspx?sid=51fca7ee-066d-426c-b246-540d28048401&cntx=yVUDPUbtN6HdizfXlHokaW3vDxKUFnrlzuXyWh5EaSztAfLf7TqCHgFfTDm3Yh0RjlqUYnxc9AHkVe%2BoMMZzg%3D%3D&idf=476
- The Basel Convention (2010). Revised technical guidelines on environmental sound management of used tyres. The Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal. Genébra. Acedido em: Abril de 2012, em: <http://archive.basel.int/meetings/oewg/oewg7/docs/i09e.pdf>
- Todd, J. and M. A. Curran (1999). Streamlined Life-Cycle Assessment - A final report from the SETAC North America - Streamlined LCA Workgroup. SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry.
- USEPA (n.d.). Carbon Black, U.S. Environmental Protection Agency. Acedido em: Setembro de 2012, em: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch06/final/c06s01.pdf>
- USEPA (2001). LCAccess - LCA 101 - Introduction to LCA. United States of America, U.S. Environmental Protection of Agency and Science Applications International Corporation.
- Valorpneu (2011). Relatório Anual & Contas de 2010, VALORPNEU - Sociedade de Gestão de Pneus, Lda. Lisboa.
- Valorpneu (2012). Relatório Anual & Contas de 2011, VALORPNEU - Sociedade de Gestão de Pneus, Lda. Lisboa.

Valorpneu (2013a). Relatório Anual & Contas de 2012, VALORPNEU - Sociedade de Gestão de Pneus, Lda. Lisboa.

Valorpneu (2013b). *Valorização Energética*. Lisboa. Acedido em: Abril de 2013, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=226&name=Valorizacao-Energetica

Valorpneu (2012). *A comercialização de pneus usados também obriga à cobrança do Ecovalor?* Acedido em: Setembro de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=101&name=A-comercializacao-de-pneus-usados-tambem-obriga-a-cobranca-do-Ecovalor?

Valorpneu (2012a). *Como é aplicado o Ecovalor?* Lisboa. Acedido em: Setembro de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=100&name=Como-e-aplicado-o-Ecovalor?

Valorpneu (2012b). *Componentes e características de um pneu*. Lisboa. Acedido em: Março de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=221&name=Componentes-e-Caracteristicas-de-um-Pneu.

Valorpneu (2012c). *Dados trimestrais Valorpneu*. Lisboa. Acedido em Março de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=316&name=Dados-Trimestrais-Valorpneu.

Valorpneu (2012d). *Indicadores Valorpneu*. Lisboa. Acedido em: Março de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?caso=GRAFICOS&lang=pt&id_object=71&name=Indicadores-Valorpneu.

Valorpneu (2012e). *Modelo operacional e financeiro*. Lisboa. Acedido em: Março de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=74&name=Modelo-Operacional-e-Financeiro.

Valorpneu. (2012f). *O que é o Ecovalor?*. Lisboa. Acedido em: Março de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=98&name=O-que-e-o-Ecovalor?

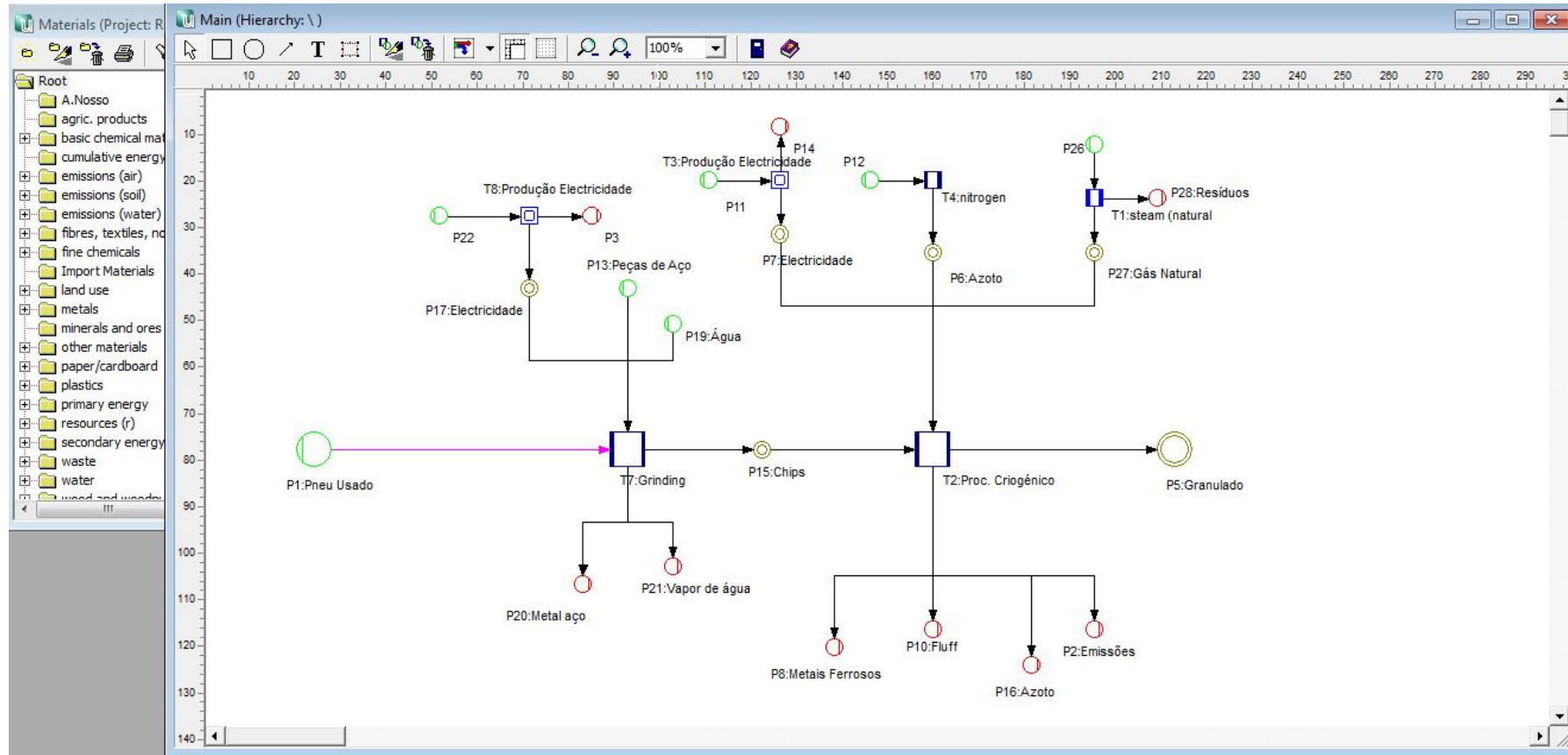
Valorpneu. (2012g). *O que fazemos*. Lisboa. Acedido em: Setembro de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=69&name=O-Que-Fazemos.

Valorpneu. (2012h). *Os pneus importados, que pagaram Ecovalor no país de origem, também têm de ser declarados à Valorpneu?* Lisboa. Acedido em: Setembro de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=102&name=Os-pneus-importados,-que-pagaram-Ecovalor-no-pais-de-origem,-tambem-tem-de-ser-declarados-a-Valorpneu?

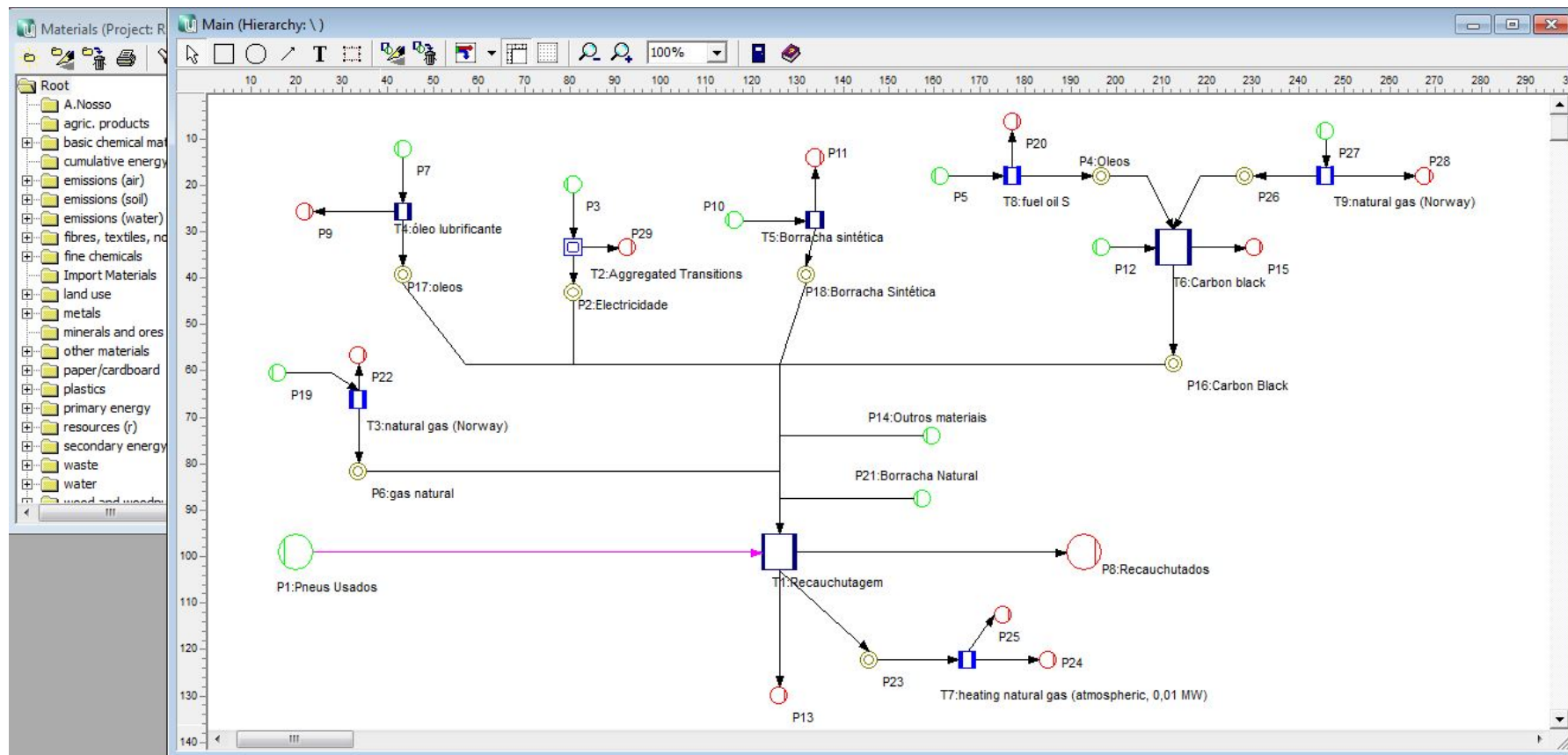
Valorpneu. (2012i). *Reciclagem*. Lisboa. Acedido em: Março de 2012, em: http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=225&name=Reciclagem.

- Van den Heede, P., Belien, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: literature review and theoretical calculations. *Cement & Composites*. **34**: 431-442
- WBCSD. (2008). Managing end-of-life tire. World Business Council for Sustainable Development. Washington. Acedido em: Maio de 2012, em: <http://www.bir.org/assets/Documents/industry/ManagingEndOfLifeTyres.pdf>
- Weiner, J., Willner, M., Hero, G. (2007). *Global history: the industrial revoluition to the age of globalization*. Volume Two. Barron’s Educational Series. Chapter 1, section 1, **1-7**. Acedido em: Junho de 2013, em: http://books.google.pt/books?id=7k5vLcatPigC&printsec=frontcover&dq=history+of+industrial+revolution&hl=pt-PT&sa=X&ei=qO3AUf_yCaiU7Qbb8oDYBw&ved=0CDwQ6AEwAg#v=onepage&q=history%20of%20industrial%20revolution&f=false
- WRAP (2007). Tyre-derived rubber materials - A technical report on the manufacture of tyre-derived rubber materials. *Waste Protocols Project*. Environmental Agency. Banbur

ANEXO A

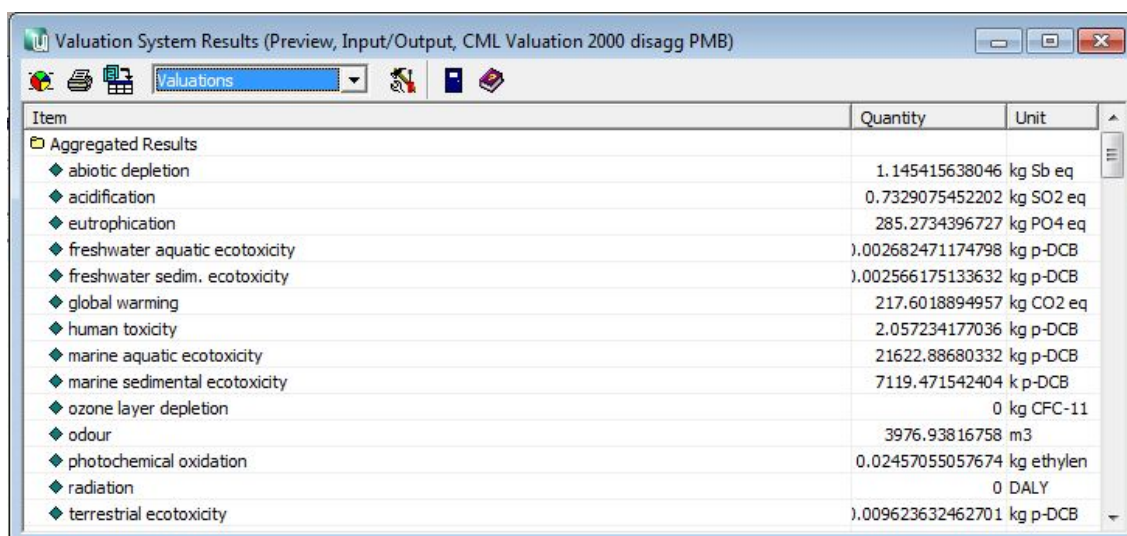


ANEXO B



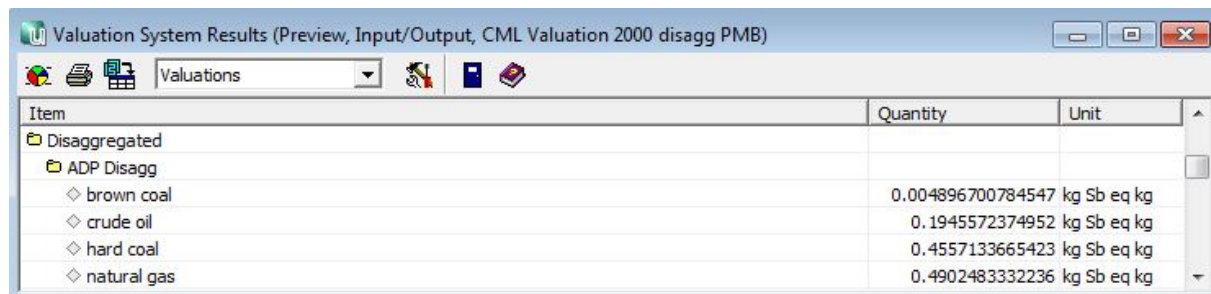
ANEXO C

Resultados agregados referentes à reciclagem criogénica

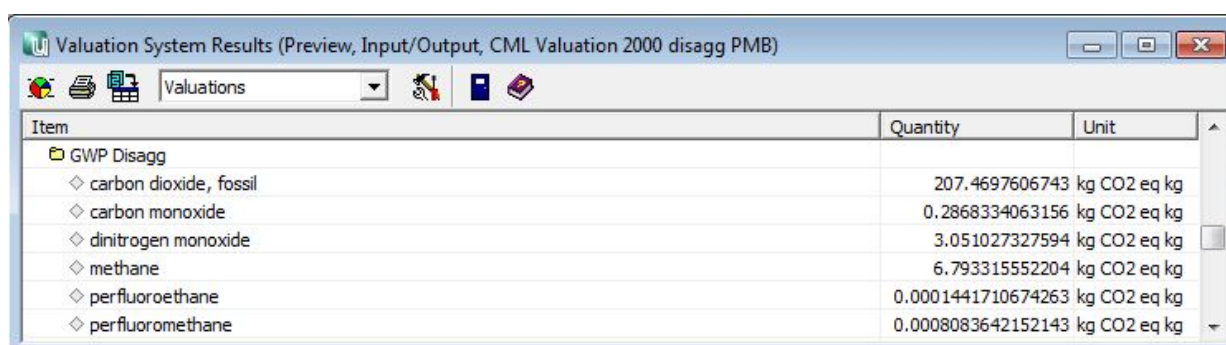


Item	Quantity	Unit
Aggregated Results		
◆ abiotic depletion	1.145415638046	kg Sb eq
◆ acidification	0.7329075452202	kg SO2 eq
◆ eutrophication	285.2734396727	kg PO4 eq
◆ freshwater aquatic ecotoxicity	1.002682471174798	kg p-DCB
◆ freshwater sedim. ecotoxicity	1.002566175133632	kg p-DCB
◆ global warming	217.6018894957	kg CO2 eq
◆ human toxicity	2.057234177036	kg p-DCB
◆ marine aquatic ecotoxicity	21622.88680332	kg p-DCB
◆ marine sedimental ecotoxicity	7119.471542404	kg p-DCB
◆ ozone layer depletion	0	kg CFC-11
◆ odour	3976.93816758	m3
◆ photochemical oxidation	0.02457055057674	kg ethylen
◆ radiation	0	DALY
◆ terrestrial ecotoxicity	1.009623632462701	kg p-DCB

Resultados desagregados dos indicadores estudados, depleção recursos abióticos (ADP) e aquecimento global (GWP).



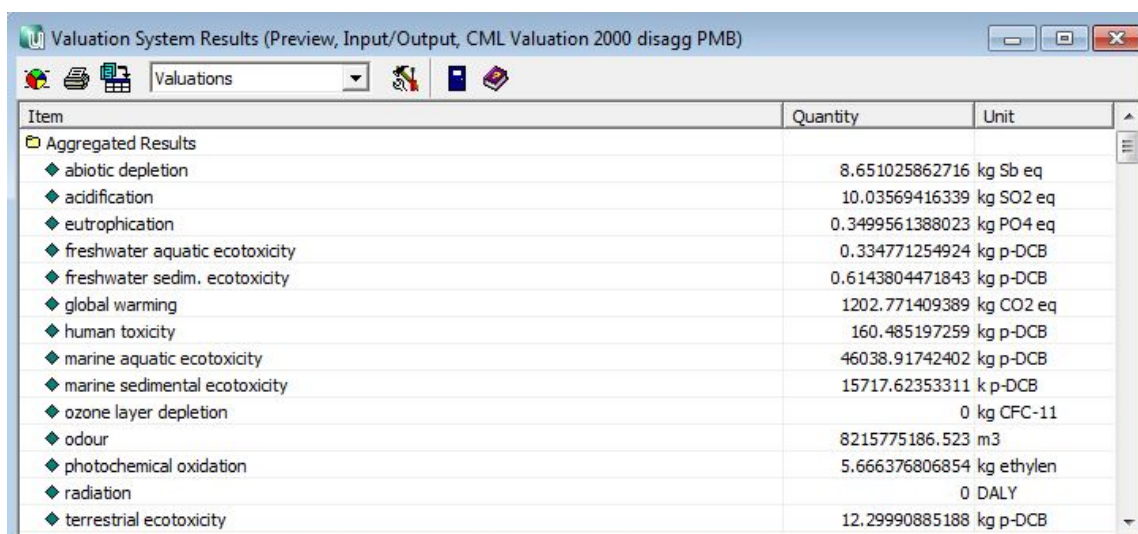
Item	Quantity	Unit
Disaggregated		
ADP Disagg		
◆ brown coal	0.004896700784547	kg Sb eq kg
◆ crude oil	0.1945572374952	kg Sb eq kg
◆ hard coal	0.4557133665423	kg Sb eq kg
◆ natural gas	0.4902483332236	kg Sb eq kg



Item	Quantity	Unit
GWP Disagg		
◆ carbon dioxide, fossil	207.4697606743	kg CO2 eq kg
◆ carbon monoxide	0.2868334063156	kg CO2 eq kg
◆ dinitrogen monoxide	3.051027327594	kg CO2 eq kg
◆ methane	6.793315552204	kg CO2 eq kg
◆ perfluoroethane	0.0001441710674263	kg CO2 eq kg
◆ perfluoromethane	0.0008083642152143	kg CO2 eq kg

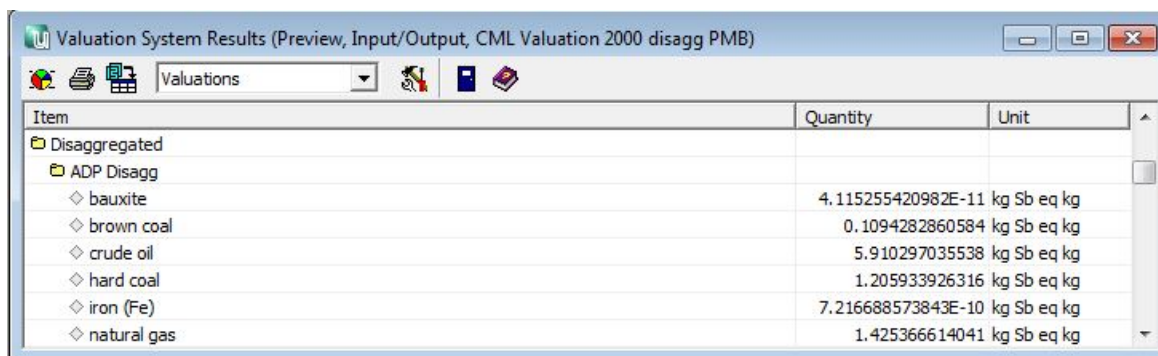
ANEXO D

Resultados agregados referentes à recauchutagem

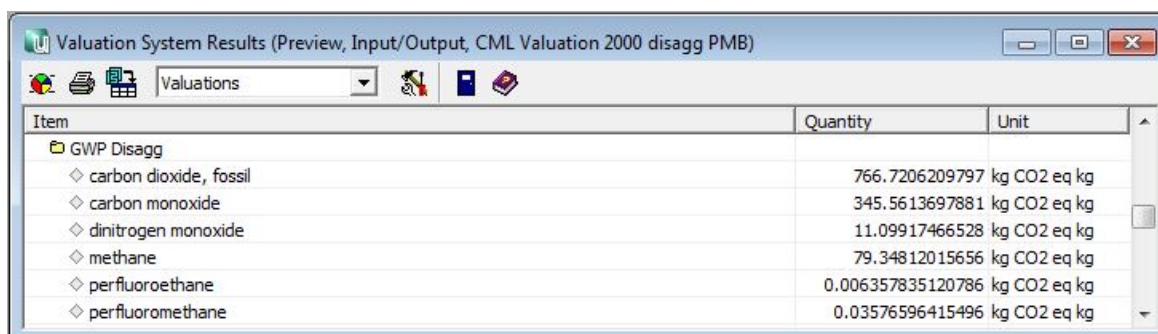


Item	Quantity	Unit
Aggregated Results		
◆ abiotic depletion	8.651025862716	kg Sb eq
◆ acidification	10.03569416339	kg SO ₂ eq
◆ eutrophication	0.3499561388023	kg PO ₄ eq
◆ freshwater aquatic ecotoxicity	0.334771254924	kg p-DCB
◆ freshwater sedim. ecotoxicity	0.6143804471843	kg p-DCB
◆ global warming	1202.771409389	kg CO ₂ eq
◆ human toxicity	160.485197259	kg p-DCB
◆ marine aquatic ecotoxicity	46038.91742402	kg p-DCB
◆ marine sedimental ecotoxicity	15717.62353311	kg p-DCB
◆ ozone layer depletion	0	kg CFC-11
◆ odour	8215775186.523	m ³
◆ photochemical oxidation	5.666376806854	kg ethylen
◆ radiation	0	DALY
◆ terrestrial ecotoxicity	12.29990885188	kg p-DCB

Resultados desagregados dos indicadores estudados, depleção recursos abióticos (ADP) e aquecimento global (GWP).



Item	Quantity	Unit
Disaggregated		
◆ ADP Disagg		
◆ bauxite	4.115255420982E-11	kg Sb eq kg
◆ brown coal	0.1094282860584	kg Sb eq kg
◆ crude oil	5.910297035538	kg Sb eq kg
◆ hard coal	1.205933926316	kg Sb eq kg
◆ iron (Fe)	7.216688573843E-10	kg Sb eq kg
◆ natural gas	1.425366614041	kg Sb eq kg



Item	Quantity	Unit
GWP Disagg		
◆ carbon dioxide, fossil	766.7206209797	kg CO ₂ eq kg
◆ carbon monoxide	345.5613697881	kg CO ₂ eq kg
◆ dinitrogen monoxide	11.09917466528	kg CO ₂ eq kg
◆ methane	79.34812015656	kg CO ₂ eq kg
◆ perfluoroethane	0.006357835120786	kg CO ₂ eq kg
◆ perfluoromethane	0.03576596415496	kg CO ₂ eq kg

